

보안과제( ), 일반과제(○) / 공개(○), 비공개( )  
토양·지하수오염방지기술개발사업 최종보고서

R&D / 2015000560004

# OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴을 통한 국내 정책사업 연구기획

R&D planning of the Korea soil and  
groundwater environment policy through  
reviewing and analyzing paradigm shifts  
of the policies in OECD countries

2017. 06. 30

총괄연구기관 / 한국환경정책·평가연구원 / 박용하  
위탁연구기관 / 한국자원경제연구소 / 고일원

환 경 부  
한 국 환 경 산 업 기 술 원



## 제 출 문

환경부장관 귀하

본 보고서를 "OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴을 통한 국내 정책사업 연구기획" (개발기간: 2015. 7. ~ 2017. 3.) 과제의 최종보고서로 9부를 제출합니다.

2017. 6. 30.

총괄연구기관명 : 한국환경정책·평가연구원 (대표자) 박광국 (인)



- (주관)연구책임자 : 박용하(2015.07.01.~2017.03.31.)
- (주관)참여연구원 : 현윤정(2016.04.01.~2017.03.31.)  
: 차은지(2016.04.01.~2017.03.31.)  
: 박지은(2015.07.01.~2016.03.31.)  
: 양지훈(2015.07.04.~2016.03.31.)  
: 이수재(2015.07.01.~2017.03.31.)  
: 황상일(2015.07.01.~2017.03.31.)
- (위탁)연구책임자 : 고일원 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2015.07.01.~2017.03.31.)
- (위탁)참여연구원 : 송민경 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2015.07.01.~2017.03.31.)  
: 문소영 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2015.07.01.~2016.08.24.)  
: 이충기 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2015.07.01.~2016.02.29.)  
: 윤대희 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2016.03.01.~2017.03.31.)  
: 이승일 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2016.08.25.~2017.03.31.)  
: 심보은 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2016.04.16.~2017.03.31.)  
: 김소라 (㈜한국자원경제연구소(총 참여기간: 2015.07.01.~2016.04.15.)



# 요 약 서

<b>사업명</b>	토양·지하수 오염방지 기술개발사업			<b>과제번호</b>	2015000560004
<b>단위사업명</b>	토양지하수 오염방지 기술개발사업	<b>대분야</b>	토양지하수 오염방지 기술개발사업	<b>중분야</b>	사후관리기술
<b>과제명</b>	OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴을 통한 국내 정책사업 연구기획			<b>기술단계</b>	기초연구
<b>최종성과 기술</b>	- OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 패러다임 - 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵			<b>참여기업</b>	-
<b>연구책임자</b>	박용하	<b>최종연도 참여연구원수</b>	12 명	<b>최종연도 연구개발비</b>	정부: 80,000천원 민간: 원 계: 80,000천원
		<b>총 연구기간 참여연구원수</b>	15 명	<b>총 연구개발비</b>	정부: 120,000천원 민간: 원 계: 120,000천원
<b>연락처</b>	044-415-7631	<b>이메일</b>	yhpark@kei.re.kr	<b>총 연구기간</b>	2015.07.01.~ 2017.3.31.
<b>연구기관명 및 소속부서명</b>	한국환경정책·평가연구원 정책연구본부 국토자연연구실			<b>연구기관 유형</b>	출연연
<b>위탁기관명</b>	(주) 한국자원경제연구소			<b>위탁책임자</b>	고일원
<b>개발 목적 및 필요성</b>	<p>OECD 국가에서 수행하고 있는 토양·지하수 환경정책의 조사 분석을 통해 향후 우리나라가 선진국형 토양·지하수 환경정책으로 전환될 수 있는 정책 패러다임을 발굴하고, 이를 통해 미래의 토양·지하수 환경 기술산업 및 전망을 토대로 하여 중장기 핵심이슈를 제시하고 로드맵을 수립하는 데 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- OECD 선진국형 토양·지하수환경정책 패러다임 발굴</li> <li>- 국내 토양·지하수환경정책 성과분석 및 미래전망</li> <li>- 토양·지하수환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 수립</li> <li>- 향후 토양·지하수환경 기술·산업 수요 및 전망분석</li> </ul>				
<b>연구개발 결과</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 우리나라에서 1980년대 이후 현재까지 추진하고 있는 토양·지하수 정책은 UN의 지속가능개발목적 (SDG, Sustainable Development Goals)과 생물다양성협약(Convention on Biodiversity), 넥서스 접근(Nexus Approach)에서의 토양·지하수에 대한 정책, 그리고 EU의 토양·지하수 정책과 비교하면 매우 낮은 단계에 있음</li> <li>- 우리나라에서는 토양 및 지하수의 기능과 생태계서비스의 보전 및 지속가능한 이용을 위한 정책, 기술·산업개발이 거의 이뤄지고 있지 있음</li> </ul>				

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 토양·지하수환경은 토양·지하수의 생태적 이용가치를 향상시키고 환경자원 순환과 회복에서 중요한 역할을 하는 정책영역으로, OECD 주요 선진국과 UN 등의 국제회의 및 학술회의에서는 물, 에너지, 식량, 폐기물, 대기를 함께 아우르는 모든 환경요소, 공간, 이동과 변화를 통찰하여 연계하여 접근 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 우리나라의 토양·지하수 정책 흐름과 주요 이슈를 고려할 때, OECD 주요 선진국에서의 토양·지하수 정책의 목적과 목표, 최근 UN 등에서 논의되고 설정된 SDG에 따라 토양지하수환경을 보전하고 지속가능하게 이용할 수 있도록 하는 정책 개념 및 수단으로서 넥서스 접근을 종합적으로 고려할 수 있음</li> </ul> </li> <li>○ 토양·지하수환경 정책의 비전은 현재와 미래, 그리고 과학과 정책을 연결시키는 새로운 개념(패러다임)의 틀로써, 우리나라의 국내외 여건, 기후변화와 토지 이용변화, 세대간과 세대내 균형을 고려하는 환경정의 실현 등의 정책변화요인, UN에서의 토양·지하수 환경보전 등의 국제동향 등을 고려할 때, 토양·지하수환경 비전을 건강, 행복, 조화로움(Health, Happiness, Harmony)으로 할 수 있음</li> <li>○ 토양·지하수 환경의 보전 및 지속가능한 이용은 국가안보 차원의 새로운 패러다임에서 i) 인간과 생태계 위해 요인의 저감, ii) 기후와 토양·지하수 환경 변화에 대한 적응력 제고, iii) 인간의 건강과 복지, 토양생태계에 미칠 수 있는 잠재적인 환경 위해에 대한 회피, iv) 토양생태계와 자원과 지속가능한 경제 발전 및 불평등 해소에 기여하는 사회적 복원력을 회복하는 것임</li> <li>○ 토양지하수 新패러다임 정책에 기반한 기술 및 산업으로 토양부문은 9개 영역인 i) 기후변화 감축 및 적응기술, ii) 토양 기능 회복 기술, iii) 토양침식 방지·복원기술, iv) 토양의 생물다양성 보전 및 지속 가능한 이용, 확보 기술, v) 토양질(유기물 등) 관리기술, vi) 토양 차폐 관리기술, vii) 토양산성화·염화방지기술, viii) 토양사태(land slide)평가·방지 기술, ix) 법, 제도·정보화 기술로 구분하여 부문별로 세부 기술개발 내용을 제시</li> <li>○ 지하수 부문은 5개 영역인 i) 사전예방적 지하수 수질 (및 지하수 의존 생태계) 보전·관리, ii) 지하수 이용 가치 제고를 위한 정책 선진화, iii) 오염지하수 사후관리 강화, iv) 수질 관련 산업 육성 및 기술개발 촉진, v) 수질 (및 지하수 의존 생태계) 관리 기반 강화로 구분하여 부문별로 세부 기술개발 내용을 제시</li> <li>○ 토양지하수 新패러다임 정책에 기반한 기술 및 산업으로 토양지하수 정책 및 기술 내용을 향후 10년을 단기(2018~2020), 중기(2021~2023), 장기(2024~)로 구분하고 기간별 발전 과제의 로드맵을 제시</li> </ul>
<b>공정·제품 사진 및 도면</b>	해당없음
<b>성능사양 및 기술개발 수준</b>	해당없음
<b>활용계획</b>	토양지하수 분야 정책 및 실무 담당, 기술개발자들의 교육 및 홍보 자료로 활용 기존 토양지하수분야 중장기계획의 추진전략을 보완하고, 새로운 토양지하수 분야 중장기계획의 추진 전략에 미래 유망 연구 분야의 발굴(사전예방 등 통합적 정책 강화 위한 자료 마련) 및 개발에 활용 예정임

주요성과	특허	출원(국내)	건	등록(국내)	건
		출원(국외)	건	등록(국외)	건
	논문	SCI급	건	일반	건
	인증	신기술인증	건	신기술검증	건
	매출	국내매출	원	해외수출	원
	정책활용	제안	2건	채택	건
	기타				
색인어 (각 5개 이상)	(한글)	토양·지하수, OECD, 연구개발, 패러다임, 기획, 기능, 건강성, 조화, 훼손, 안보, 토양·지하수보전정책, 기술 및 산업 로드맵			
	(영문)	soil and groundwater, OECD, R&D, paradigm, planning, function, health, harmony, degradation, security, policy, technology and industry, roadmap			



## 요 약 문

### □ 연구개발결과의 보안등급

보안등급 분류	□ 보안과제      ■ 일반과제
결정 사유	해당사항없음

### □ 평가의 착안점 및 기준

구분	세부내용	평가의 착안점 및 기준
1차 년도	OECD 선진국 토양환경정책 패러다임 발굴	주요국 정책방향대비 추진 패러다임발굴여부
	국내 토양환경정책 성과분석·미래전망	기존 토양환경보전계획 정책이행 성과분석
	국내토양지하수환경산업인프라 분석	토양지하수환경산업인프라 조사 및 시사점 도출
2차 년도	OECD 선진국 지하수환경정책 패러다임 발굴	주요국 정책방향대비 추진 패러다임발굴여부
	국내 지하수환경정책 성과분석·미래전망	기존 지하수환경보전계획 정책이행 성과분석
	토양·지하수환경정책 중장기 핵심 이슈 및 정책사업 로드맵 수립	새로운 패러다임 대비 정책계획 수립
	향후 토양·지하수환경 기술산업 수요 및 전망분석	미래 수요 예측
최종 평가	OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴	주요국 정책 방향 대비 추진 패러다임 발굴 여부
	국내 토양·지하수 환경정책 성과분석·미래전망	기존 토양·지하수 환경보전계획 정책 이행 성과분석
	국내 토양·지하수 환경산업 인프라 분석	토양·지하수 환경산업인프라 조사 및 시사점
	토양·지하수 환경정책 중장기 핵심 이슈 및 정책사업 로드맵 수립	새로운 토양·지하수 환경정책 패러다임 대비 정책계획 수립
	향후 토양·지하수 환경 기술산업 수요 및 전망 분석	미래수요 예측

## I. 연구과제명

- 주 관 과 제 명 : OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴을 통한 국내 정책사업 연구기획
- (세부) 과제명 : 토양·지하수환경기술·산업 수요 및 전망분석

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 현재까지 우리나라의 토양지하수환경정책은 주로 토양지하수의 오염관리 및 방지에 초점을 두고 있어 토양지하수환경의 통합생태관리체계에 부합하는 미래방향을 설정하고 새로운 정책방향과 정책과제를 설정할 필요가 있음
- 본 연구의 목적은 OECD 국가에서 수행하고 있는 토양·지하수 환경정책의 조사 분석을 통해 향후 우리나라가 선진국형 토양·지하수 환경정책으로 전환될 수 있는 정책 패러다임을 발굴하고, 이를 통해 미래의 토양·지하수 환경기술·산업 및 전망을 토대로 하여 중장기 핵심이슈를 제시하고 로드맵을 수립하는 데 있음

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- OECD 선진국형 토양·지하수환경정책 패러다임 발굴
- 국내 토양·지하수환경정책 성과분석 및 미래전망
- 토양·지하수환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 수립
- 향후 토양·지하수환경 기술·산업 수요 및 전망분석

## IV. 연구개발 결과

- 우리나라에서 1980년대 이후 현재까지 추진하고 있는 토양·지하수 정책은 UN의

지속가능개발목적 (SDG, Sustainable Development Goals)과 생물다양성협약 (Convention on Biodiversity), 넥서스 접근(Nexus Approach)에서의 토양·지하수에 대한 정책, 그리고 EU의 토양·지하수 정책과 비교하면 매우 낮은 단계에 있음

- 우리나라에서는 토양 및 지하수의 기능과 생태계서비스의 보전 및 지속가능한 이용을 위한 정책, 기술·산업개발이 거의 이뤄지고 있지 있음

○ 토양·지하수환경은 토양·지하수의 생태적 이용가치를 향상시키고 환경자원 순환과 회복에서 중요한 역할을 하는 정책영역으로, OECD 주요 선진국과 UN 등의 국제회의 및 학술회의에서는 물, 에너지, 식량, 폐기물, 대기를 함께 아우르는 모든 환경요소, 공간, 이동과 변화를 통찰하여 연계하여 접근

- 우리나라의 토양·지하수 정책 흐름과 주요 이슈를 고려할 때, OECD 주요 선진국에서의 토양·지하수 정책의 목적과 목표, 최근 UN 등에서 논의되고 설정된 SDG에 따라 토양·지하수환경을 보전하고 지속가능하게 이용할 수 있도록 하는 정책 개념 및 수단으로서 넥서스 접근을 종합적으로 고려할 수 있음

○ 토양·지하수환경 정책의 비전은 현재와 미래, 그리고 과학과 정책을 연결시키는 새로운 개념(패러다임)의 틀로써, 우리나라의 국내외 여건, 기후변화와 토지이용 변화, 세대간과 세대내 균형을 고려하는 환경정의 실현 등의 정책변화요인, UN에서의 토양·지하수 환경보전 등의 국제동향 등을 고려할 때, 토양·지하수환경 비전을 건강, 행복, 조화로움(Health, Happiness, Harmony)으로 할 수 있음

○ 토양·지하수 환경의 보전 및 지속가능한 이용은 국가안보 차원의 새로운 패러다임에서 i) 인간과 생태계 위해 요인의 저감, ii) 기후와 토양·지하수 환경 변화에 대한 적응력 제고, iii) 인간의 건강과 복지, 토양·생태계에 미칠 수 있는 잠재적인 환경 위해에 대한 회피, iv) 토양·생태계와 자원과 지속가능한 경제 발전 및 사회적 불평등 해소에 기여하는 사회적 복원력을 회복하는 것임

○ 토양·지하수 新패러다임 정책에 기반한 기술 및 산업으로 토양·부문은 9개 영역인 i) 기후변화 감축 및 적응기술, ii) 토양 기능 회복 기술, iii) 토양·침식 방지·복원기술, iv) 토양의 생물다양성 보전 및 지속 가능한 이용, 확보 기술, v) 토양질

(유기물 등) 관리기술, vi) 토양 차폐 관리기술, vii) 토양산성화·염화방지기술, viii) 토양사태(land slide)평가방지 기술, ix) 법, 제도·정보화 기술로 구분하여 부문별로 세부 기술개발 내용을 제시

- 지하수 부문은 5개 영역인 i) 사전예방적 지하수 수질 (및 지하수 의존 생태계) 보전·관리, ii) 지하수 이용 가치 제고를 위한 정책 선진화, iii) 오염지하수 사후관리 강화, iv) 수질 관련 산업 육성 및 기술개발 촉진, v) 수질 (및 지하수 의존 생태계) 관리 기반 강화로 구분하여 부문별로 세부 기술개발 내용을 제시
- 토양·지하수 新패러다임 정책에 기반한 기술 및 산업으로 토양·지하수 정책 및 기술 내용을 향후 10년을 단기(2018~2020), 중기(2021~2023), 장기(2024~)로 구분하고 기간별 발전 과제의 로드맵을 제시

## V. 연구개발결과의 활용계획(기대효과)

- 토양·지하수 분야 정책 및 실무 담당, 기술개발자들의 교육 및 홍보 자료로 활용
- 토양·지하수 분야 중장기계획 추진전략을 보완하고, 미래 연구 및 기술개발 분야 발굴(사전예방 등 통합적 정책 강화를 위한 자료 마련)에 활용

---

# SUMMARY

## (영문요약문)

---

### **I. Title**

- Main Project : R&D planning of the Korea soil and groundwater environment policy through reviewing and analyzing paradigm shifts of the policies in OECD countries
- Unit Project : Demand analysis of soil and groundwater environmental technology and industry, and their prospects

### **II. The Objective & Necessity of the Research**

- Korea's soil and groundwater environment policy focusing mainly on contamination management including prevention of soil and groundwater have become an issue for an ecological aspect. It needs to consider the integrated ecological management of soil and groundwater environment and establish a new policy direction and tasks for our future
- Purposes of this study are i) to seek a new and policy paradigm shift of Korea's soil and groundwater environment policies based on analysis of OECD countries, ii) to investigate core issues of technology and industry development for mid- to long-term periods, and iii) to establish a roadmap for policy, technology and industry of soil and groundwater environment

### **III. Contents and Scope**

- Seeking for a paradigm shift on soil and groundwater environment policy

reaching the level of OECD countries

- Analysis of soil and groundwater environment policy in Korea and prospect
- Investigation of mid- to long-term period's core issues of technology and industry development of soil and groundwater environment policy and establishing a roadmap
- Analysis of demands of soil and groundwater environmental technology and industry and prospect

#### **IV. Results**

- In Korea, Soil and groundwater policy since the 1980s is incompatible for the UN Sustainable Development Goals (SDG), Convention on Biodiversity, and Nexus Approach, and EU countries' soil and groundwater policy.
  - In Korea, functions and ecosystem services of soil and groundwater are not considered for the conservation and sustainable use of soil and groundwater policies, technologies and industries
- Soil and groundwater environment is a core policy area that plays an important role in improving the ecological values of soil and groundwater. OECD countries including The United Kingdom, German, The Netherlands, United States, and Austria take the ecological values into their policies. Integral and the Nexus approach which considers enviro-, socio-, and economical aspects of various factors including land-use, water, energy, food, waste and the atmosphere is carried out in their the soil and groundwater environment policies. The Nexus approach is also a core discussion issue in various international conferences and UN conventions
  - we may consider the Nexus approach as a key mean to conserve and sustainably utilize the soil and groundwater environment regarding to our soil and groundwater situation and the OECD countries' policies and the UN SDG
- We choose a policy vision of soil and groundwater environment. A policy vision is a conceptual (paradigm) framework connecting science and policy, and present and future. Regarding the climate change, the land use change, enviro-, socio-, and economical aspects of soil and

groundwater use of Korea and international trends, we choose the 3Hs (health, happiness, harmony) as the vision of soil and groundwater environment policy.

- As a new shifting paradigm of soil and groundwater security, the policy for the conservation and sustainable use of soil and groundwater environments should focus on i) reducing human and ecological hazards, ii) improving adaptation ability to climate change, soil and groundwater environment changes, iii) avoiding potential environmental risks to human health and welfare, soil ecosystems, and other environmental resources; and iv) restoring resilience to soil ecosystems and other environmental resources which may contribute to resolve the socio- and economical inequality
- Based on the new paradigm shift policy, technologies and industries of soil sector is divided into nine areas: i) climate change mitigation and adaptation technology, ii) soil functional recovery technology, iii) soil erosion prevention and restoration technology, iv) soil biodiversity conservation and sustainable use, securing biotechnology, v) soil quality (soil organic matter etc.) management technology, vi) soil sealing management technology, vii) soil acidification and salinization prevention technology, viii) Land slide evaluation and prevention technology; ix) Law, institutional and information technology
- Technologies and industries of the groundwater sector is divided into five areas: i) precautionary conservation and management of groundwater quality (and groundwater-dependent ecosystems), ii) policy development for enhancing groundwater-use value, iii) policy development for managing contaminated groundwater, iv) promotion of industry upbringing and technology development related groundwater quality, and v) enhancing infrastructure of groundwater quality management (and groundwater-dependent ecosystem)
- Based on the new paradigm, a roadmap was developed for suitable and better legislation and institutional appropriates, technologies, and industries of soil and groundwater. The roadmap divides the next 10

years into the short term (2018 ~ 2020), the middle term (2021 ~ 2023) and the long term (2024 ~), and shows detailed contents of future policies, technologies, and industries needed.

## **V. Business Application Based the Outcomes**

- a benchmarking education and advertizing material for whom is involved in policy, technology, and industry of soil and groundwater environment conservation and sustainable use
- complementing the mid- and long-term strategy and planning of soil groundwater conservation and sustainable use, and utilize to find out policy and research areas (to prepare materials for precautionary and strengthening integrated and the nexus policies)

# < 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 .....	1
1-1. 연구개발 목적 .....	1
1-2. 연구개발의 필요성 .....	1
1-3. 연구개발 범위 .....	5
2. 국내외 기술개발 현황 .....	11
2-1. 해외 기술개발 현황 .....	11
2-2. 국내 기술개발 현황 .....	13
3. 연구수행 내용 및 결과 .....	16
3-1. 연구개발의 내용(범위) 및 최종목표 .....	16
3-2. 연구개발 결과 및 토의 .....	17
3-3. 연구개발 결과 요약 .....	314
4. 목표달성도 및 관련분야 기여도 .....	319
4-1. 목표달성도 .....	319
4-2. 관련분야 기여도 .....	320
5. 연구결과의 활용계획 .....	321
6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	321

7. 연구개발결과의 보안등급 .....	322
8. NTIS에 등록된 연구시설·장비 현황 .....	322
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 .....	322
10. 연구개발과제의 대표적 연구실적 .....	322
11. 기타사항 .....	322
12. 참고문헌 .....	323

# < 표 목 차 >

<표 1-1> 본 연구의 연도별 연구개발의 목표 및 범위 .....	5
<표 2-1> 기존 지하수질 계획의 비교 .....	15
<표 3-1> 유럽협의회(Council of Europe, 1990)가 명시한 보호되어야 할 토양의 기능 .....	19
<표 3-2> EC(2010)와 MEA(2005)의 토양기능과 관련된 생태계 서비스 .....	21
<표 3-3> 우리나라의 주요 토양오염시설에 의한 오염부지 .....	39
<표 3-4> 우리나라 농경지의 토양 침식 등급별 분포 .....	42
<표 3-5> 지하수환경의 오염을 유발하는 잠재오염원 .....	48
<표 3-6> 토양보전 기본계획 5대 추진과제 및 세부내용 .....	59
<표 3-7> 표토보전종합계획(2013년-2017년)의 전략 및 중점 추진과제 .....	61
<표 3-8> 국내 표토 보전 관련 사업 추진 현황 .....	62
<표 3-9> 지하수관리기본계획 5대 추진과제 및 세부내용 .....	64
<표 3-10> 지하수수질관리기본계획(2012년-2021년)의 추진전략 및 중점 추진과제 .....	65
<표 3-11> 국가 환경 정책방향 변화 .....	68
<표 3-12> 토양·지하수환경부문 미래수요 .....	71
<표 3-13> 현행 토양·지하수 환경산업 체계 현황 .....	80
<표 3-14> 현행 토양·지하수 환경산업 전망상 세부사업내용 발굴 사례 .....	81
<표 3-15> 지하수환경 관련사업 .....	84
<표 3-16> 토양환경관련 법률 .....	86
<표 3-17> 토양환경의 질과 관련된 성과지표 .....	88
<표 3-18> 지하수환경정책 성과지표 .....	91
<표 3-19> EU에서 인식하고 있는 토양의 특성 .....	93
<표 3-20> 유럽연합 국가의 잠재 오염부지와 오염부지 .....	95
<표 3-21> 유럽 국가들의 SOC 함량 .....	100
<표 3-22> 유럽연합 27개국 회원국의 토양차폐의 압력, 현상, 반응 .....	104
<표 3-23> EC에서 간주하고 있는 토양질의 훼손에 의한 비용부담 사례 .....	105
<표 3-24> EU 제7차 환경이행프로그램(EAP)의 9개 우선목적 .....	107

<표 3-25> 토양의 탄소를 관리하기 위한 EU LIFE Environment 2014의 토양의 탄소관리 부문 .....	108
<표 3-26> EU LIFE Environment 2014의 토양의 탄소 관리 주요 과제 .....	109
<표 3-27> EU LIFE Environment 2014의 토양보전을 위한 지속가능한 농업 정책지원 과제 .....	109
<표 3-28> EU LIFE Environment 2014의 토양생물다양성을 보전 및 복원하기 위한 주요 과제 .....	112
<표 3-29> EU LIFE Environment 2014의 물과 토양을 연계한 주요 과제 .....	113
<표 3-30> EU LIFE Environment 2014의 토양 현황자료의 모니터링 체계 구축 및 운영을 위한 주요 과제 .....	116
<표 3-31> EU LIFE Environment 2014의 토양 오염부지 확인 및 복원을 위한 주요 과제 .....	117
<표 3-32> EU의 토양의 기능과 생태계서비스에 관련된 제도 .....	118
<표 3-33> EU LIFE Environment 2014의 토양을 보전하기 위한 주요 부문별 과제 .....	119
<표 3-34> EU의 지하수 관련 정책 현황 .....	124
<표 3-35> 미국의 지하수환경 주제별 주요 법·제도·지침·관련 프로그램 현황 .....	148
<표 3-36> 미국의 지하수환경 관련 법제도 .....	149
<표 3-37> UIC 주입정 등급별 관정 용도 .....	154
<표 3-38> 독일의 잠재적 오염부지 수와 종류 .....	157
<표 3-39> 독일 토양보호의 목적 .....	159
<표 3-40> 독일의 토양 차폐 방지 수단과 프로그램 .....	163
<표 3-41> 독일의 지하수환경 관련 주요 법·제도·지침·프로그램 현황 .....	169
<표 3-42> 토양질의 저하에 따라 발생하는 UK의 경제적 손실 .....	172
<표 3-43> 영국의 잠재적 오염부지 정보 .....	173
<표 3-44> 영국의 잠재적 오염부지 정보 .....	173
<표 3-45> 영국의 지하수환경 관련 법제도·지침·프로그램 .....	185
<표 3-46> 네덜란드에서 오염부지 또는 굴착 토양의 처리 규칙 .....	190
<표 3-47> 네덜란드의 지하수환경 관련 정책 현황 .....	196
<표 3-48> 네덜란드의 지하수환경 관련 주요 법·제도 .....	197
<표 3-49> 네덜란드의 지하수환경 관련 주요 법·제도 .....	198
<표 3-50> 일본 농경지 토양오염 및 정화부지 현황 .....	207
<표 3-51> 토양오염대책법의 토양오염에 관한 환경 기준 .....	209
<표 3-52> 일본의 지하수 수질 보전에 관한 법제 .....	217
<표 3-53> 중국 토양문제 정책 추진 경과 .....	221

<표 3-54> 중국 「국가지하수오염방지계획」 추진 사업 투자계획 및 주요내용 .....	229
<표 3-55> 중국 「물 오염 방지법(水污染防治法)」에 의한 지하수 오염 방지 규정 .....	230
<표 3-56> UN 지속가능한 개발 목적 (Sustainable Development Goals)과 주요 내용 ...	232
<표 3-57> 중국 토양재생 프로젝트 참여 외국기업 .....	247
<표 3-58> OECD 주요국의 정책과 제도 및 국가별 중장기 프로젝트 조사·분석 체계 ...	254
<표 3-59> 토양안보의 위협 요소 .....	258
<표 3-60> 국내·외 토양환경정책, 기술 및 산업 여건과 SWOT * .....	262
<표 3-61> 국내·외 지하수환경정책, 기술 및 산업 여건과 SWOT .....	263
<표 3-62> 주요 기술·산업 미래 트렌드 정리 .....	264
<표 3-63> 새로운 토양·지하수산업의 개념 .....	264
<표 3-64> LIFE 프로그램대비 기존 추진영역분석 및 신규추진 시사점 .....	281
<표 3-65> 토양환경 추진정책별 토양환경 필요기술 .....	282
<표 3-66> 지하주입정(Underground Injection Well) 분류체계 .....	294
<표 3-67> 지하수 추진정책별 지하수환경 필요기술 .....	296

# < 그림 목 차 >

<그림 1-1> 토양과 지하수의 위협요인과 영향 .....	4
<그림 1-2> 연구의 추진체계 및 방법 .....	6
<그림 1-3> OECD 주요국 및 국제기구 등에서 토양·지하수 환경정책의 미래 환경수요 발굴 조사 체계 .....	7
<그림 1-4> 토양·지하수분야 메타분석기반의 벤치마킹 대상 국가 또는 대상 정책 분석 체계 .....	8
<그림 1-5> 선진 주요국의 정책방향, 정책 운영 체계, 유사기관 벤치마킹을 통한 토양·지 하수 정책 이슈와의 연계 방법 .....	8
<그림 3-1> 토양의 생물다양성이 기여하는 생태계 서비스 .....	20
<그림 3-2> 토양에서의 물의 이동 경로 .....	22
<그림 3-3> 지구에서 토양탄소의 흐름 .....	24
<그림 3-4> 지하수를 보유하고 있는 매체의 분류 체계 .....	27
<그림 3-5> 지하수 시설수 및 이용량 .....	28
<그림 3-6> 하천유량과 기저유출량의 상대비율 .....	30
<그림 3-7> 지하수로 인한 지반침하 사례 .....	31
<그림 3-8> 지하수 의존 수생태계 개념도 .....	32
<그림 3-9> 기후변화와 토양의 탄소저장과의 관계 모식도 .....	35
<그림 3-10> EU 21개국의 농경지 이용 변화 .....	36
<그림 3-11> EU 21개국의 농경지 이용 변화에 따른 밀생산 감소 .....	36
<그림 3-12> 토양오염에 의한 생태계 훼손 경로 .....	38
<그림 3-13> 유럽 17개국의 국가 GDP(국민총생산)와 잠재오염부지(PCS)의 관계 .....	39
<그림 3-14> 토양침식과 생물량, 생물다양성의 관계 .....	40
<그림 3-15> 토양침식의 직접 또는 간접적인 영향과 요소 간의 상호 관계 .....	41
<그림 3-16> 토양 유기탄소의 흐름 .....	43
<그림 3-17> 유럽연합 27개국의 토양차폐율(%) .....	46
<그림 3-18> 질소의 순환관계 .....	51
<그림 3-19> 미국의 지반침하로 인해 추정되는 피해비용 .....	53
<그림 3-20> 지하수 과잉 양수로 인한 지하수위 변화와 해수침투 .....	54

<그림 3-21> 지하수위 감소에 따른 하천건천화 및 생태계 훼손 .....	55
<그림 3-22> 2000년 이후 우리나라의 토양·지하수 정책상 제도 추진 경위 .....	58
<그림 3-23> 지하수법 제정 이후의 지하수관리기본계획의 흐름 .....	64
<그림 3-24> 토양지하수환경 5대 분야별 메가트렌드 .....	67
<그림 3-25> 연도별 토양·지하수시장규모 추산 그래프 .....	74
<그림 3-26> 토양환경기술 전망 .....	78
<그림 3-27> 토양·지하수 환경산업육성계획 상 산업 체계 전망 .....	81
<그림 3-28> EU 국가의 인구 1000명당 잠재오염부지 .....	94
<그림 3-29> 유럽의 (a)확인된 정화 부지 수, 33개국에서 보고된 잠재오염부지 및 오염부지 수. (b)38개국을 대상으로 추정된 잠재오염부지 및 오염부지 .....	95
<그림 3-30> 유럽의 산업·상업활동에 의한 토양오염부지의 구분 .....	96
<그림 3-31> 유럽에서 물에 의한 토양의 유실 .....	97
<그림 3-32> PESERA 모델에 의한 유럽의 토양 침식 위험도 .....	99
<그림 3-33> 유럽국가 토양의 유기물함량 .....	100
<그림 3-34> 자연적으로 토양다짐에 민감한 유럽 지역의 토양 분포 .....	101
<그림 3-35> EU 국가의 토양 염화 현황 .....	102
<그림 3-36> 유럽의 토양차폐 민감지역 (짙은 갈색 및 황색지역) .....	103
<그림 3-37> 유럽 국가들의 오염부지 특성 .....	114
<그림 3-38> 유럽국가에서의 오염토양 처리 방법 .....	115
<그림 3-39> 유럽 국가의 지하수 과잉양수와 해수침투 .....	121
<그림 3-40> 2012년 EU국가들의 "물 평정"과 관련 자료 축적(보고서 작성)의 기본 구조 .....	122
<그림 3-41> "DPSIR" 개념도 .....	127
<그림 3-42> EU의 지하수체 정의 및 특성화 개념도 .....	127
<그림 3-43> 2012년 EU국가들의 질산염취약지구 설정현황 .....	129
<그림 3-44> GWDTEs 개념도 .....	130
<그림 3-45> 미국 농경지에서의 침식량 변화 추이 .....	134
<그림 3-46> 지하수 고갈에 따른 영향 .....	139
<그림 3-47> 미국의 지하수 고갈 상태 .....	140
<그림 3-48> 지하수위 저하로 인한 아리조나주 산타크루즈강 근처 하천변의 식생 변화 .....	141
<그림 3-49> 미국의 지하수 양수로 인한 대수층 압밀에 기인한 침하 발생 지역 .....	142
<그림 3-50> 미국 농업, 도시지역 천부관정의 질산성 질소 농도와 질소 부하량 .....	145

<그림 3-51> 미국의 건강상 수질기준을 초과하는 살충제 농도를 가진 하천과 관정의 비율	145
<그림 3-52> 미국 지하수 내 아트라진(atrazine)의 검출 예측도	146
<그림 3-53> SGD에 의한 해양오염지역과 해수침투지역의 위치를 보여주는 SGD 핵심지역 지도	147
<그림 3-54> 미국 SSA 지정 예	152
<그림 3-55> 독일의 토양차폐 현황	158
<그림 3-56> 독일의 평균 부지 이용 및 차폐율	162
<그림 3-57> 바덴볼템베르그 주 정주 및 교통시설 지역을 위한 부지 이용	164
<그림 3-58> 영국의 지하수홍수의 분류 및 개념도	179
<그림 3-59> 영국의 지하수홍수사례	179
<그림 3-60> 오스트리아의 토양차폐 현황	200
<그림 3-61> 오스트리아의 부지 이용 및 토양의 차폐율	202
<그림 3-62> 일본의 토양환경보전 정책의 흐름	208
<그림 3-63> 일본 토양오염대책법의 체계	208
<그림 3-64> 일본 농경지 오염부지의 관리대책	210
<그림 3-65> 일본 농약의 관리대책 체계	211
<그림 3-66> 일본 다이옥신류의 관리대책 체계	212
<그림 3-67> 일본의 기후변화로 인한 강수 변동 추이	214
<그림 3-68> 일본의 기후변화로 인한 강수 변동 추이	215
<그림 3-69> 일본 지반침하 추세	216
<그림 3-70> 중국의 지하수 양수에 의한 지반침하 예: 중국 Suzhou시의 지하수 양수량 변화와 지반침하 변화율	226
<그림 3-71> 물, 에너지, 식품 안보의 넥서스 접근	238
<그림 3-72> 기후변화에 따른 식량안보에 영향을 주고 있는 토양-물-에너지-작물 넥서스 연관 체계	238
<그림 3-73> 넥서스 접근에서의 기후변화, 토양, 물, 생물다양성의 연계	239
<그림 3-74> 미국 토양·지하수 주요 오염정화기업 현황	242
<그림 3-75> 유럽 토양·지하수 주요 오염정화기업 현황	245
<그림 3-76> OECD 주요 선진외국에서 추진하고 있는 토양보전을 위한 주요 정책 분야	253
<그림 3-77> 스코틀랜드 토양기능의 위협요인 순위	253
<그림 3-78> 토양질의 훼손 유형	255
<그림 3-79> 토양안보와 연계된 토양의 기능과 과학적 개념	257

<그림 3-80> 토양·지하수 환경보전 정책의 비전 .....	265
<그림 3-81> 토양·지하수의 건강성을 훼손하는 PFC 연관관계 .....	267
<그림 3-82> 토양·지하수환경 정책 요소들의 SWOT 분석 .....	269
<그림 3-83> 토양·지하수환경 SWOT 요소들간의 전략 방향 및 전략 .....	270
<그림 3-84> 토양·지하수 환경의 보전 및 지속가능한 이용 전략 .....	272
<그림 3-85> 토양의 정의, 대상범위에 따른 관련 기술 도출 .....	278
<그림 3-86> 표토환경 기술산업 신규영역 발굴 .....	280
<그림 3-87> 기후변화와 토양탄소저장관계 모식도 .....	285
<그림 3-88> 토양환경 건강성 평가기술 .....	287
<그림 3-89> 경작지에서의 토양침식 저감방안 .....	288
<그림 3-90> 상명대 융합생태환경공학 개념 .....	289
<그림 3-91> 도시지역 토양차폐 저감기술 개념 .....	290
<그림 3-92> 자연발생 오염물질의 제어 및 자연저감 처리기법 .....	299
<그림 3-93> 미국의 생태위해성평가 기법 .....	300
<그림 3-94> 나노물질 주입을 통한 지중환경 원위치 정화기술의 예시 .....	302
<그림 3-95> 수처리 기술 개념 .....	303
<그림 3-96> 수처리 기술에 적용되는 물의 기초과학 .....	304



# 1. 연구개발과제의 개요

## 1-1. 연구개발 목적

- ▷ 본 연구의 목적은 OECD 국가에서 수행하고 있는 토양·지하수 환경정책의 조사 분석을 통해 향후 우리나라가 선진국형 토양·지하수 환경정책으로 전환될 수 있는 새로운 정책 패러다임을 발굴하고, 이를 통해 미래의 토양·지하수 환경기술 산업 및 전망을 토대로 하여 중장기 핵심이슈를 제시하고 로드맵을 수립하는 데 있다.

## 1-2. 연구개발의 필요성

- ▷ 우리나라의 토양지하수환경정책은 지난 30여년간 법제도의 수정보완과 함께 정책 이행 수단이 다양화되고 체계화되었다.
- ▷ 현재까지 우리나라의 토양지하수환경정책은 주로 토양지하수의 오염관리 및 방지에 초점을 두고 있어 토양지하수환경의 통합생태관리체계에 부합하는 미래방향을 설정하고 새로운 정책방향과 정책과제를 설정할 필요가 있다.

### ■ 토양·지하수 분야 환경정책 전환점 도래

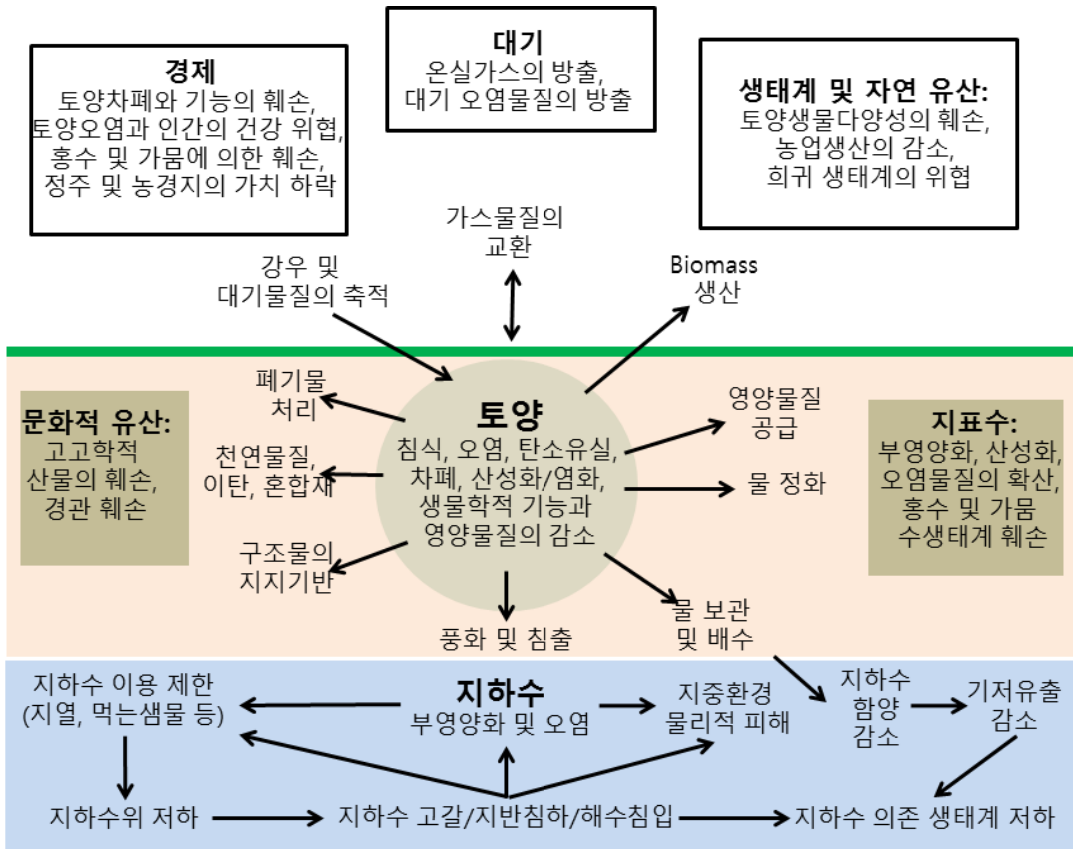
- 그간의 토양·지하수환경정책은 유해화학물질에 기반한 환경유해인자의 오염조사와 정화 사업에 치중되어 있어 국민적 환경편의 발생하는 공공적 토양·지하수 자원의 활용이 확대될 필요가 있다.
- 기존 토양·지하수 환경정책은 다음과 같은 주요 이슈들이 도출되고 있다.
  - 토양환경보전법 제정 이후 가축매몰지, 석면발생지역, 폐광산 주변지역 등 신규 토양·지하수 오염관리 지역 증가
  - 토양·지하수 통합관리를 위한 연계성 확보
  - 토양·지하수 환경분야 정책수단이 다양화되고 수행사업도 체계화
  - 주요국의 토양·지하수환경의 통합생태관리체계에 부합하는 미래방향을 설정하고 새로운 정책방향과 정책과제 도출

## ■ 토양·지하수 환경정책의 패러다임 변화

- 20세기 이후 산업과 농업 등의 발달로 인해 토양층이 사라지거나, 오염되어 그 본래의 기능을 상실하거나 그 기능이 점차 낮아지고 있다.
  - 유럽공동체(EC, 2010)는 토양의 본래 기능을 훼손시키는 요인으로 토지의 이용변화, 기후변화, 토양의 침식, 화학물질에 의한 오염, 침입외래종, 유기물질의 고갈, 침식, 염화(salinisation), 도로와 건물 등에 의한 토지 표면의 다짐(compaction) 및 차폐(sealing), 외래종, 유전자변형생물체(Genetically Modified Organisms, GMO) 등을 제시하고 있다 (EC, 2010; Jeffrey et al., 2010; EEA, 2007).
- 유럽연합(EU)의 여러 선진 국가들과 미국을 포함하고 있는 OECD 국가에서는 중금속을 포함한 화학물질에 의한 토양오염방지 정책과 더불어 토양생태계의 보전과 지속가능한 이용을 통해 건강한 토양생태계를 보전하고 토양과 지하수의 건강성을 유지하는 정책을 추진하고 있다.
  - EU를 포함한 여러 OECD 국가에서는 토양의 건강성을 유지하기 위한 통합적인 방법으로 ‘토양의 생물다양성을 보전하기 위한 토양생물다양성 지침’을 마련하여 정책에 반영하고 있다 (EC, 2012).
- 우리나라에서는 1996년 1월6일 제정된 「토양환경보전법」에서 토양생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 한다.”고 명시되어 있으나, 최근까지의 현행법률 및 제도는 토양오염방지 및 오염부지의 복원과 관리 부문에 치우쳐 있으며, EU를 포함한 여러 OECD 국가에서 추진하고 있는 본래의 토양생태계 서비스 기능을 유지하기 위한 국가의 체계적인 정책은 시행되고 있지 않다.
  - 환경부(2013)는 토양생태계의 환경적 기능을 유지하기 위한 ‘표토보전 5개년 종합계획’을 수립하였으며, 표토의 대량손실을 유발할 수 있는 골프장, 산업단지 등의 인위적인 침식에 따른 표토유실을 방지하기 위하여 표토환경영향평가를 2016년부터 시행하기로 계획되어 있는 등, 최근 토양 생태계 서비스 기능을 보전하고 지속가능한 토양환경의 이용 정책이 제시되고 있는 등 토양의 생태계서비스 보전 및 지속가능한 이용이 논의되기 시작했다.
- 한편, 도시화에 따른 도로포장, 지하공간의 개발이용은 지하수의 유동체계를 교란시킬 뿐만 아니라 지중(지표 또는 지하)환경의 훼손과 오염을 가중시킬 수 있다. 산업활동의 증가는 산업용수(농,공업)의 수요를 증가시키고 화학물질에 의한 지하수오염의 우려를 가중시킨다. 이 외에도 온실가스 감축 요구 정책에 의한 CCS 시설 설치 및 신재생에너지(지

열, 원자력 등) 시설 증가 등은 지하수환경을 건강성을 위협하는 요인이다.

- 이 외에도 가뭄, 홍수 등의 기후변화는 물공급의 안정성을 위협하고 있는데, 이에 대처하기 위한 정책으로 OECD 국가에서는 지표수-지하수 복합이용과 관리를 추진하고 있다.
  - 해수면 상승으로 인한 염침투 등 해안지역 담수지하수 자원의 수질에 대한 위협이 커지고 있다. 여러 OECD 국가에서는 지역 간· 국가 간의 물공급에 대한 이해충돌의 가능성이 높아지면서 물공급의 취수원으로 지표수와 지하수를 모두 활용하는 등 수원다변화의 노력을 기울이고 있다.
- 우리나라에서는 “지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보전·관리에 관한 사항을 정함으로써 적정한 지하수개발·이용을 도모하고 지하수오염을 예방하여 공공의 복리증진과 국민경제의 발전에 이바지함을 목적으로” 1993년 12월 「지하수법」을 제정하여 주로 지하수 개발이용시설 및 행위에 대한 관리를 위주로 추진되어 왔다.
  - 국토교통부 지하수법에 근거하여 10년마다 ‘지하수관리기본계획’을 수립하여 지하수 관리의 토대를 마련하고 있다. 그러나 전체 수자원에서의 지하수의 역할과 가치에 대한 자리매김을 명확하게 하지 못하여 지속가능한 지하수의 이용 및 보전관리 등에 대한 정책이 전반적으로 미흡한 편이다.
- 최근 산업화, 기후변화 등을 이유로 지하수자원의 가치가 증대되고 있는 만큼 지하수 수질환경관리의 고도화에 대한 정책 수요요구 증가하고 있으며, 지하수 수질보전 및 오염관리에 관한 법제도 개편이 요구되고 있다.
  - 지하수 수질관리 부문 기본계획 마련을 통해 정책사업 수행 중(먹는물관리, 지하수수질보전 대책, 토양·지하수오염방지기술개발사업, CO<sub>2</sub>환경관리기술개발사업 등)이다.
  - 현행 「지하수법」만으로는 지하수의 오염방지와 수질관리의 목적을 이루는 데에 한계가 나타나고 있으며, 지하수오염과 다른 환경 매체와의 연계성을 고려하여 지하수의 보전과 관리에 관한 법령을 재정비할 때에 다른 법률을 검토, 연계 방안을 모색할 필요가 있다.



자료: Scottish Government(2009)에서 재인용; Turbé et al.(2010) 수정 및 내용 추가 작성

<그림 1-1> 토양과 지하수의 위협요인과 영향

■ 토양·지하수 환경산업의 패러다임 변화

- 국내 토양·지하수 시장규모를 확대하고 산업을 활성화하기 위해서는 토양·지하수 정화 전문업체인 중소기업의 적극적인 성장 지원이 필요하다.
  - 국내 기업 해외 시장진출 시에 전문 인력 및 해외정보 부족으로 인한 어려움을 겪고 있으며, 국내의 토양·지하수 산업의 수요측면에서도 현재까지는 사전 및 사후관리 분야까지 산업의 고도화가 이루어지지 않은 상태이다.
  - 이는 공급원 측면에서는 아직 비활성화 된 사업부분까지 확대방안을 모색하지 않은 경우로 향후에는 토양·지하수 환경산업의 패러다임 변화와 이를 기조로 한 세부적인 토양·지하수 환경산업의 고도화가 필요할 것이다.

### 1-3. 연구개발 범위

- 본 연구는 2년간 추진하는 사업으로 1차년도와 2차년도에서 추구하는 연구개발의 목표와 범위는 <표 1-1>과 같다.

<표 1-1> 본 연구의 연도별 연구개발의 목표 및 범위

구분	연구개발의 목표	연구개발의 범위
1차 년도	- 신규 패러다임 발굴 및 제시 - 기존 정책성과 분석	- OECD 선진국 토양환경정책 패러다임 발굴, 제시 및 사례연구 - 국내 토양환경정책 성과분석·미래전망
	- 토양·지하수환경산업 인프라분석 및 진단	- 국내 토양·지하수환경산업인프라 분석
2차 년도	- 신규 패러다임 발굴 및 제시 - 기존 정책성과 분석	- OECD 선진국 지하수환경정책 패러다임 발굴 - 선진국 우수 지하수환경정책 사례 연구 - 지하수환경정책 중장기 추진방향 및 新패러다임 제시
	- 정책사업 계획수립	- 토양·지하수환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 수립
	- 미래 기술·산업 수요 및 전망분석	- 지하수환경 현황, 이슈, 미래 트렌드 전망 - 지하수환경 기술·산업분야 제도·인프라 현황진단 및 전망 - 정책과 기술·산업 연계성 강화를 위한 정책사업화 이슈 및 거버넌스 운영방안

- 본 연구는 2년간 4개의 세부과업으로 구분하여 수행하였다.

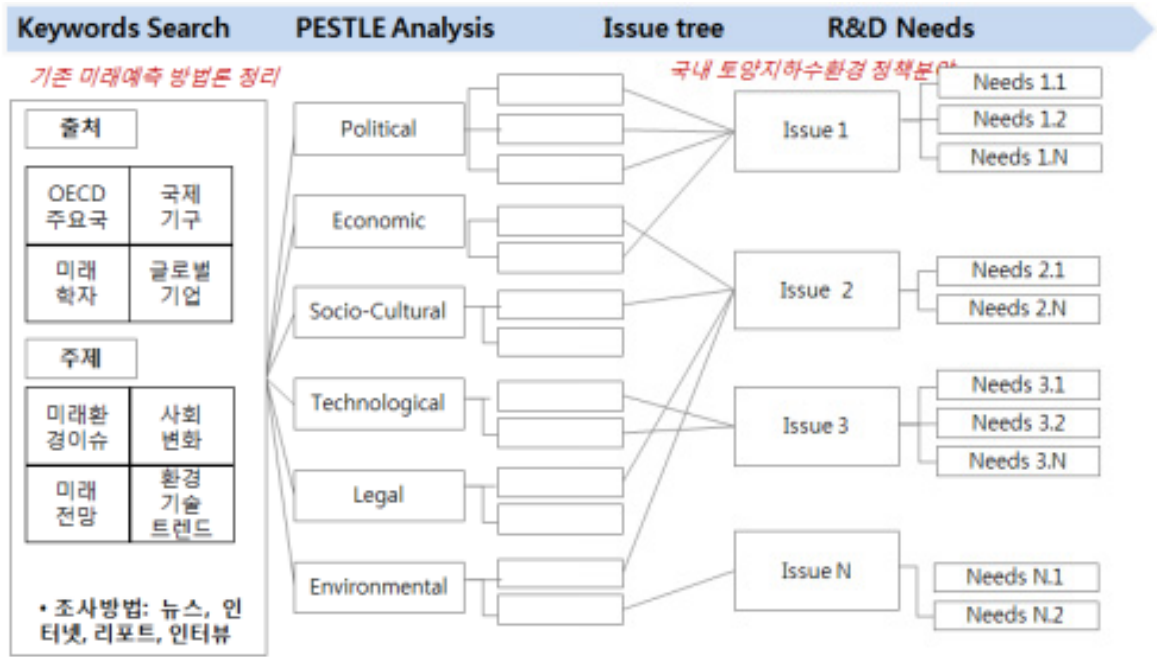
- 제1과업: 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴
- 제2과업: 토양·지하수 환경정책분석 및 미래전망
- 제3과업: 토양·지하수 환경 기술 산업 수요 및 전망분석
- 제4사업: 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 개발

세부과업	수행내용	수행방법
Task 1 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴	- OECD 국가 미래 환경수요 조사 - OECD 국가 토양· 지하수 환경정책 분석	- 미래환경분석 - 우수사례분석
Task 2 토양· 지하수 환경정책분석 및 미래전망	- 국내 환경현안 및 미래전망 자료 조사· 분석 - 국내 정책적 투자방향 및 성과분석	- 상위· 유관환경정책 분석 - 미래토양· 지하수 환경 메타 분석
Task 3 토양· 지하수 환경 기술· 산업 수요 및 전망분석	- 기술· 산업 인프라 조사분석 - 기술· 산업 수요 및 전망분석	- 기술· 산업 인프라 분석 - 수요설문
Task 4 토양· 지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵	- 국내 토양· 지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 도출 - 토양· 지하수 환경정책사업 추진계획 수립	- 중장기핵심이슈 도출 - 정책계획 수립 - 성과지표개발

<그림 1-2> 연구의 추진체계 및 방법

## ■ 제1과업

- 토양· 지하수 환경정책 패러다임 발굴사업으로 i) OECD 국가 미래 환경수요 조사, ii) OECD 국가 토양· 지하수 환경정책 분석하는 세부사업으로 구분하여 추진하였다.
  - OECD 국가 미래 환경수요 조사에서는 OECD 주요국 및 국제기구에서 발간한 자료의 주요 핵심용어의 조사 및 분석, PESTLE(Politic, Economic, Socio-Cultural, Technological, Legal, and Environmental) 분석, 현재 및 미래 이슈 분석 및 종합하여 환경에 영향을 미치는 미래의 연구 개발 수요를 정리하였다.
  - 과업수행 항목 별로 핵심 성공 요인을 도출하고 이에 대해 본 연구 과제의 수행에서 핵심 성공적 요인을 도출하였다.



<그림 1-3> OECD 주요국 및 국제기구 등에서 토양·지하수 환경정책의 미래 환경수요 발굴 조사 체계

- OECD 국가 토양·지하수 환경정책분석 및 미래전망 부문은 OECD 주요국의 정책과 제도 및 국가별 중장기 프로젝트를 조사·분석하는 것으로 현행 토양정책 정화산업에 편향된 시각을 미래 토양공공성 회복 및 정책 사각지대에 대응할 수 있는 정책을 발굴하였다.
- 이 부문에서는 통합관리체계 구축에 대응하는 정책의 발굴, 예를 들면, 토양분야 Life program, 지하수분야 미국의 주별 지하수 정책 역할 분담, 그리고 유럽지침과 국가별 연관 관계를 분석하였다.
- 토양·지하수분야 메타분석기반의 벤치마킹 대상 국가 또는 대상 정책사례의 자료 수집을 통해 우수정책 사례분석 및 종합시사점을 도출하였다.



<그림 1-4> 토양·지하수분야 메타분석기반의 벤치마킹 대상 국가 또는 대상 정책 분석 체계

- 선진국 주요정책방향 설정에 따른 주요국 정책운영 체계를 분석하되, 국내 전문가를 최대한 활용하여 의견수렴을 통해 국내 정책연계성을 구체화하였다.



<그림 1-5> 선진 주요국의 정책방향, 정책 운영 체계, 유사기관 벤치마킹을 통한 토양·지하수 정책 이슈와의 연계 방법

## ■ 제2과업

- 토양·지하수 환경정책분석 및 미래전망 부문은 i) 국내 환경현안 및 미래전망 자료 조사·분석, ii) 국내 정책적 투자방향 및 성과분석을 통해 접근하였다.
- 국내 환경정책에 영향을 주는 미래 이슈의 조사·분석은 환경보전중기종합계획, 미리안, NTIS, 과학기술예측조사(2005~2030)등의 미래 환경 및 생태계에 영향을 줄 수 있는 사안 및 미래 유망 기술 대비 미래 환경정책 주제를 검토하여 도출하였다.
  - (환경 이슈 분석) 지구온난화, 환경오염 증가, 에너지 자원 및 물, 식량자원 부족 등은 미래 글로벌 환경 정책에 영향을 끼칠 수 있는 글로벌 메가트렌드이고, 사회적으로 증대되는 환경서비스 요구 또한 미래 주요 연구 및 이슈를 분석하였다.
  - (사회·경제 이슈분석) 공신력 있는 주요 기관 발간 자료는 세계화로 인한 오염원·유해 생물 이동, 인구의 증가세와 도시화 심화 등은 환경 문제 등을 분석하였다.
- 국내 정책적 투자방향 및 성과분석은 현 정부의 국정과제, 국가상위계획, 환경부 정책·법규 및 국내 환경관련 중장기 계획 분석을 기초로 한 추진방향·계획, 그리고 유관계획으로부터 추진정책을 정리하고 분석하였다.
  - 국내 환경현안 조사 부문에서는 환경관련 법체계(환경정책기본법, 토양환경보전법, 지하수법, 먹는 샘물, 표토 등 관리법규 및 제도)와 차기 추진정책수요, 환경부 업무보고와 토양·지하수환경정책 연계성을 분석함으로 환경현안에 대응하기 위한 토양·지하수환경에 특화된 연구이슈를 조사하였다.
- 토양·지하수 유관계획으로부터 추진정책을 분석하여 성과를 분석하였다.
  - (대상) 그간의 토양·지하수 관련 추진정책 이력을 정리하였다.
  - (성과기준 설정·기여도 분석) 추진내용의 지속성, 성과연계 등을 새로운 패러다임에 따른 세부내용으로 구조화를 검토하였다.

## ■ 제3과업

- 토양·지하수 환경 기술 산업 수요 및 전망분석은 i) 기술·산업 인프라 분석과 ii) 기술·산업 수요 및 전망분석으로 구분하여 접근하였다.
- 기술·산업 인프라 분석은 기술·산업 연계 및 거버넌스 운영방안을 포함하여 국내 환경 관련 중장기 추진계획과 토양·지하수환경 산업 업무 영역을 연계 분석하여 산업 중장기

전략에 시사점을 획득하였다.

- 또한 국내 환경 관련 중장기 계획의 위치와 역할을 조명하고 기술원 등의 환경산업 유관기관의 중장기 연구개발 계획을 보완하였다.
- 유관기관 등 이해관계 분석을 통해서 정책집행기관의 역할분담(안)을 토대로 거버넌스 운영 방향을 설정했다.
- 토양·지하수·환경산업 경제적·산업적 인프라를 분석하였다.
- 기술·산업 수요 조사는 정책수단 우선순위를 위해서 연구진 메타분석 및 미래환경 전문가 인터뷰 중심으로 도출내용의 의견 수렴, 정책기반 우선순위에 대한 중점정책 분야 수행내용을 포럼 및 워크숍을 통해 도출, OECD 정책분석 내용을 기초로 패러다임을 반영한 정책수단의 중점정책수단을 도출하였다.
- 기술·산업 전망분석은 토양기본계획(2009) 및 지하수수질관리 기본계획(2013)에 따른 토양·지하수·환경산업의 정책성과를 조사하였다.
  - 기술·경제·사회적 성과, 사업 의견수렴에 대한 성과항목과 조사지표를 바탕으로 설계하고, 발생성과의 취합이 용이하도록 조사서를 구성하였다.

#### ■ 제4과업

- 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 개발로 i) 국내 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 도출, ii) 토양·지하수 환경정책사업 추진계획 수립으로 구분하여 추진하였다.
- 국내 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 도출 부문은 EU 및 주요국가, 일본, 중국의 추진전략 및 계획을 분석하고 사전예방, 환경매체 및 통합 관리 등 미래 유망 토양·지하수·환경 정책 주제 시사점 도출 해외 주요 국가의 환경전략 및 계획을 통하여 선진 주요 국가들의 정책방향을 설정하였다.
- OECD 주요 국가(관련국가 추가)의 환경전략 및 계획을 통하여 새로운 토양·지하수 환경정책 및 산업기술 개발 로드맵은 OECD 국가 패러다임 발굴, 국내환경정책의 성과분석, 선진국형 신패러다임 설정 단계를 거쳐 도출했다.
- 새로운 패러다임대비 추진정책을 평가하기 위한 성과지표는 OECD 성과지표 등 국제적으로 통용되는 환경정책관련 성과지표와 건 변화에 따른 토양·지하수·환경이슈 대비 추진전략 수립과 연계하여 성과지표를 개발하였다.

## 2. 국내외 기술개발 현황

### 2-1. 해외 기술개발 현황

#### 가. 토양환경정책 현황

- 토양은 지구의 외곽 표면으로 생물과 무생물이 어우러져 있는 생태계를 이루고 있으며, 토양의 생물과 무생물은 인류의 생존에 필요한 다양한 생태계 서비스를 제공하고 있다.
  - 즉 지구 생물의 1/4이 거주하고 있는 불균질한 매체(heterogenous medium)로써 비옥한 토양 1g에는 수백만 이상의 생물과 미생물 개체가 어우러져 살고 있으며, 이들은 다양한 토양의 생태계 서비스 기능을 제공하고 있다.
- 토양의 생태계서비스 기능은 영양물질의 순환, 토양의 형성, 토양 내 물질의 이동, 저장, 식량의 제공, 토양오염물질의 제거, 의약품의 제공, 깨끗한 물의 제공, 공기의 정화, 토양의 유실 및 침식방지, 탄소의 저장, 지구의 기후변화에 영향을 미치는 가스의 배출량 조절, 식물의 성장과 토양상층부의 생물다양성을 지원하는 다양한 역할을 포함하고 있다.
- 유럽공동체(EC, 2010)은 토양의 본래 기능을 훼손시키는 요인으로 토지의 이용변화, 기후변화, 토양의 침식, 화학물질에 의한 오염, 침입외래종, 유기물질의 고갈, 침식, 염화(salinisation), 도로와 건물 등에 의한 토지 표면의 다짐(compaction) 및 차폐(sealing), 외래종, 유전자변형생물체(Genetically Modified Organisms, GMO) 등을 제시하고 있다.

#### 토양의 생태계서비스 기능 강화

- 유럽연합(EU)의 여러 선진 국가들과 미국을 포함하고 있는 OECD 국가에서는 중금속을 포함한 화학물질에 의한 토양오염방지 정책과 더불어 토양생태계의 보전과 지속가능한 이용을 통해 건강한 토양 생태계를 보전하고 토양과 지하수의 건강성을 유지하는 정책을 추진하고 있다.
- EU를 포함한 여러 OECD 국가에서는 토양의 건강성을 유지하기 위한 통합적인 방법으로 ‘토양의 생물다양성을 보전하기 위한 토양생물다양성 지침’을 마련하여 정책에 반영하고 있다.

## 나. 지하수환경정책 현황

### 주요 선진국 지하수 수질관리 실태

- 미국
  - 통일된 지하수 법은 없으나, 안전음용수법(SDWA), 자원보전과 복원법(RCRA), 종합환경보상및대응법(CERCLA), 청정수법(CWA) 등을 적절히 적용하여 효과적인 지하수 보호·관리 실시
  - 지하수 공적 이용 개념아래 각 주정부가 일차적 지하수 보호책임을 지고, US EPA는 지하수 보호 프로그램 수행을 종합적으로 관장
  - 연방정부의 지하수보호정책(저질화 불허용 정책, 제한적인 저질화 정책, 차등 보호정책, 혼합형 정책)을 통해 엄격한 지하수 수질관리가 이루어지고 있음
- 일본
  - 지하수 규율의 상당 부분이 지자체의 지하수보전 조례나 수질보전 조례를 통해 이루어짐
  - 향후 일본의 물정책과 물관련법에서 지표수 보다는 지하수 수질보전의 중요성을 부각, 지하수기본법을 통해 지하수의 국가 소유를 규정하고 지하수 함량, 배분, 질과 양의 동시보전을 위한 법제화 추진
- 유럽
  - 프랑스 : 물 사용자는 동시에 물 오염자라는 인식 확산,물관리법(물의 관리 및 배분과 물의 오염방지에 관한 법률)의 제정(1964년) 이후 종합적인 수자원 관리 실시. 특히 수질 보전, 오염방지에 중점
  - 네덜란드 : 공공 공급 용수의 70%가 지하수로서 음용수법에 따라 71개 항목에 대한 수질검사, 1968년부터 수질자료를 보관하여 수질 변화 경향을 확인 및 취수정 주위에 감시정을 설치하여 지하수 수질의 조기경보체제를 실시 중
  - ※ 미국은 오염지하수의 정화와 오염방지에 주력하는 반면, 유럽은 지하수 오염방지, 지하수의 최적이용과 배분문제에 동시 주력
- 지하수법을 개정하여 지하수를 공수화(公水化)하고 엄격한 지하수 수질관리를 실시, 이를 근거로 지하수의 수량과 수질관리를 일원화하여 통합관리 필요

### 지하수 수질 통합환경관리 추진

- 지하수 수질측정망 확대 운영 및 수질관리 선진화
  - 국가지하수수질전용측정망 분석항목 단계적 조정 운영방안 마련
- 지하수·지표수 연계관리에 따른 지하수 수질통합관리
  - 지하수-지표수 연계 최적 수질관리방안 마련 실증 운영
- 국가 지하수 정화 추진 및 정화 활성화를 위한 제도 구축
  - 수질기준 설정체계 개선에 따른 정화기준 설정 및 적용방법 개선
  - 지하수 오염원인 규명을 위한 제도 및 절차 마련
  - 지하수 오염지역에 대한 원인자 규명 사업 추진
  - 국가 지하수 정화 우선순위 등 후속조치 우선순위 목록 작성
- 지질·유역·대수층 단위 지하수 수질관리 추진
  - 지질·유역·대수층 단위 지하수 수질관리 방법론 개발을 위한 시범사업 실시
  - 지질·유역·대수층 단위 지하수 수질관리 중장기 수행계획 마련

## 2-2. 국내 기술개발 현황

### 가. 토양환경정책 현황

- 우리나라에서 토양의 기능에 대해 사회적 관심이 증가하기 시작한 것은 1990년대 이후이며, 이 시기에는 금속광산, 특히 휴·폐광된 금속광산과 석탄광산, 불량매립지, 산업시설 등에서 배출되는 오염물질에 의한 토양의 오염과 본래의 기능상실이 다양한 경로를 통해 밝혀지기 시작하였고, 이러한 문제점 등을 국가 차원에서 적극적으로 해결하기 위해 「토양환경보전법」이 1995년 1월 제정·발효하였다.
- 「토양환경보전법」 제1조(목적)에는 이 법은 “토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고, 토양생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 한다.”고 명시되어 있으나, 현행법률 및 제도상에는 토양생태계의 보전 대상, 수단과 방법 등이 제시되어 있지 않는 등 토양 본래의 기능을 유지하기 위한 토양생태계 보전에 관련된 국가의 체계적인 정책은 시행되고 있지 않다.
- 아울러 오염토양의 경우 오염물질만 제거 또는 감소시켜 토양정화·복원(remediation)을 완료한 것으로 판단하고 있어, 토양의 기능 향상, 생태적 가치 부여 및 보전 등 법에서 정한 기본 목적에도 부합되지 않고 있다.
- 우리나라의 경우, 토양의 생물다양성보전 정책은 EU와 비교하면 더욱 낮은 단계에 있음. 기존의 생물다양성 법률 및 계획의 경우, 토양생물다양성의 중요성과 생태계의 복원능력, 여러 조절서비스 제공 등이 전혀 반영되어 있지 않다.
- 한편, 2013년 환경부는 토양생태계의 환경적 기능을 유지하기 위한 ‘표토보전 5개년 종합계획’을 수립하였으며, 표토의 대량손실을 유발할 수 있는 골프장, 산업단지 등의 인위적인 침식에 따른 표토유실을 방지하기 위하여 표토환경영향평가를 2016년부터 시행하기로 계획되어 있는 등, 최근 토양 생태계 서비스 기능을 보전하고 지속가능한 토양환경의 이용 정책이 제시되고 있는 등 토양의 생태계서비스 보전 및 지속가능한 이용에 대한 실마리가 나타나고 있다.

## 나. 지하수환경정책 현황

- 1993년 제정된 지하수법은 국내 지하수 수자원 관리 및 계획, 정책 수립의 근간이 되는 모범으로 주로 지하수 수자원의 수량관리 및 개발 및 이용에 관련된 제도 정립에 초점을 두고 있다.
- 수도법에 근거한 음용수 수질기준이 지하수법 제정 이전까지 지하수에 일괄적으로 적용되었으나 지하수법 제정 이후에는 지하수법에 근거하여 일반오염물질 5항목, 특정 유해물질 10항목을 포함한 지하수 수질기준이 1994년에 만들어졌다
  - 1995년, 지하수 수질기준 중 생활용수, 농어업용수, 공업용수를 제외한 “음용수”로 사용되는 지하수의 경우 먹는 물 관리법에 의거 먹는 물 수질기준을 준수하도록 하고 있다.
- 국내의 지하수는 별도의 수처리 없이 언제 어디서나 쉽게 사용할 수 있고, 사용하고자 할 때 개발이 용이하며, 수량도 비교적 풍부한 데다 사용자가 주변 환경 및 사용량에 대해 조금만 주의를 기울이면 장기간 편리하게 사용이 가능하기 때문에, 전세계적으로 추진하고 있는 ‘지속가능한 발전’의 개념에 잘 들어맞는 유형의 환경 및 자원이다.
- 현행 「지하수법」만으로는 지하수의 오염방지와 수질관리의 목적을 이루는 데에 한계가 있어서 지하수오염과 타매체와의 연계성을 고려하여 지하수의 보전과 관리 및 연계 방안 모색이 있어야한다.
  - 효율적 지하수 수질통합관리를 위한 실효적인 제고방안으로서, 지하수 관리제도 변화에 따라 건전한 지하수 개발·이용 및 보전·관리를 위한 지하수의 공공 관리를 강화해야 한다.

<표 2-1> 기존 지하수질 계획의 비교

구분	지하수 수질보전 종합대책 (2005)	지하수 수질관리 선진화대책 (2009)	지하수관리기본계획 (2006)
계획 기간	2005-2014 (10개년)	2010-2019(10개년)	2002~2011(10개년)
	- 1단계:2005~2009(5년) - 2단계:2010~2014(5년) - 2010년 상반기 중간평가 후 조정	- 1단계:2010~2013(4년) - 2단계:2014~2016(3년) - 3단계:2017~2019(3년) - 각 단계 종료 시 추진실적 점검 및 차단계 조정	- 1단계:2002~2006(5년) - 2단계:2007~2011(5년) - 2002년 계획을 중간평가 후 재수립 - 현재 2012년 지하수관리기본계획 수립 진행 중
비전	- 깨끗한 지하수 수질 보전	- 온국민을 위한 지하수의 생명수화	- 지속가능한 미래 청정 지하수의 체계적인 보전·관리 기반 강화
목표	- 지하수오염 발생원별 관리 및 정화대책 마련	- 미래 대표수자원으로서의 지하수 가치 제고	- 공적자원인 지하수의 합리적인 개발·이용 및 보전·관리 - 수자원으로서의 지하수의 안정적인 수량·수질 확보
추진 전략	- 과학적·체계적 실태조사에 기초한 정책추진 - 오염저감 및 정화를 위한 적정 기술 개발 - 참여와 협력을 통한 지하수 수질 관리 - 지하수 수질 관리체계 개선	- 지하수 수질관리 선진 기반 마련 - 사전예방적 취수정 보호 대책 - 오염지하수 사후관리 강화 - 기후변화에 대응하는 지하수 보전 및 활용 - 지하수 녹색산업 육성 및 국제협력 강화	- 지하수의 지속적인 조사관측 및 체계적인 개발·이용 - 청정수자원으로서 지하수의 미래가치 확보를 위한 보전·관리 - 제도적 인프라 구축을 통한 지하수 관리기반 강화

○ 지하수 수질보전 및 오염관리에 관한 법제도 개편 요구로 「지하수법」내 지하수 수질보전·관리에 관한 규정들을 강화하여 환경보전이라는 큰 틀의 메커니즘에서 지하수의 보전에 관한 규정을 재편하고 있다.

- 현행 「지하수법」만으로는 지하수의 오염방지과 수질관리의 목적을 이루는 데에 한계가 있다.
- 지하수오염과 타매체와의 연계성을 고려하여 지하수의 보전과 관리에 관한 법령을 재정비할 때에 다른 법률을 검토, 연계 방안 모색해야한다.

<p>■ 환경부 주요계획</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2005.12. 지하수 수질보전 종합대책</li> <li>○ 2009.12. 지하수 수질관리 선진화 대책</li> <li>○ 2012.12. 지하수 수질관리 기본계획 수립</li> </ul>	<p>■ 국토해양부 주요계획</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1993.12. 지하수법 제정</li> <li>○ 1996.12. 지하수관리 기본계획 수립</li> <li>○ 2002.12. 지하수관리 기본계획 재수립</li> <li>○ 2007.12. 지하수관리 기본계획 보완</li> <li>○ 2012.12. 지하수관리 기본계획 재수립</li> </ul>
---	--

### 3. 연구수행 내용 및 결과

#### 3-1. 연구개발의 내용(범위) 및 최종목표

##### 가. 연구개발의 최종목표

- ▷ 국내 토양·지하수 환경정책의 신 패러다임 발굴
- ▷ 토양·지하수 환경정책의 단계별 추진방향 및 신규·개선 정책사업 도출
- ▷ 정책과 기술·산업 연계성 강화를 위한 정책사업화 미래 이슈 도출 및 내용 작성

##### 나. 연도별 연구개발의 목표 및 내용

○ 연도별 연구개발의 주요 목표와 내용은 다음과 같다.

구분	연구개발의 목표	연구개발의 내용	비고
1차년도	신규 패러다임 발굴 및 제시 기존 정책성과분석	- OECD 선진국 토양환경정책 패러다임 발굴, 제시 및 사례연구 - 국내토양환경정책 성과분석·미래전망	주관
	토양지하수환경산업 인프라분석 및 진단	- 국내토양지하수환경산업인프라 분석	위탁
2차년도	신규 패러다임 발굴 및 제시 기존 정책성과분석	- OECD 선진국 지하수환경정책 패러다임 발굴 - 선진국 우수 지하수환경정책 사례 연구 - 지하수환경정책 중장기 추진방향 및 新패러다임 제시	주관
	정책사업 계획수립	- 토양·지하수환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 수립	
	미래 기술·산업 수요 및 전망분석	- 지하수환경 현황, 이슈, 미래 트렌드 전망 - 지하수환경 기술·산업분야 제도·인프라 현황진단 및 전망 - 정책과 기술·산업 연계성 강화를 위한 정책사업화 이슈 및 거버넌스 운영방안	위탁

## 3-2. 연구개발 결과 및 토의

### 가. 토양지하수 기능 및 생태계서비스

#### (1) 토양의 정의 및 기능

##### (가) 토양의 정의 및 토양생태계<sup>1)</sup>

###### ■ 토양의 구성 및 토양생태계

- 토양(흙)은 광물질, 유기물질, 가스, 액체, 그리고 다수 생물체들로 구성되어 있는 지구의 표면층(pedosphere)으로 지구 생태계의 주요 구성 요소이다 (International Standards Organisations(ISO) 11074-1 of 1.08.1996).
  - 대부분의 토양은 1~2g/cm<sup>3</sup>의 밀도 범위에 있으며, 지구 생물의 1/4이 거주하고 있는 불균질한 매체로써(Decaens et al., 2006), 비옥한 토양 1g에는 수백만 이상의 미생물과 선충(nematodes), 톱토기(springtails), 진드기(mites), 개미(ants & mites)와 딱정벌레(beetles) 등의 곤충, 지렁이, 소형 포유류, 식물 등이 서식한다.
  - 토양의 입자 밀도(soil particle density)는 부분이 2.60~2.75g/cm<sup>3</sup>이며 일정하게 유지되고 있으며, 토양의 용적 밀도(soil bulk density)는 양의 종류에 따라 차이가 크며, 대부분의 경작지 토양은 1.1~1.4g/cm<sup>3</sup>이다.
  
- 토양에 있는 다양한 생물과 무기질이 포함된 토양입자, 유기물질, 무기물질, 물, 공기가 어우러져 토양생태계를 이루고 있다.
  - 생태계(ecosystem)란 “생물이 그 환경과 함께 구성하고 있는 물리적 시스템”으로 “지구 표면의 기본적 단위”이고, 이 시스템 중에는 “모든 종류의 상호변화가 생물과 생물 간만이 아니라 생물과 무생물의 사이에도 존재한다”고 정의된다 (Tansley, 1935).
  - 토양생태계란 “토양을 생활의 근원지로 하고 있는 생물과 이를 둘러싸고 있는 토양입자, 유기물질, 무기물질, 물, 공기 등의 무생물과 역동적인 상호작용이 일어나고 있는 하나의 계(system)”으로 정의할 수 있다.

1) 박&최(2012)의 토양생태계의 구성 및 서비스 내용을 기본으로 토양의 정의와 토양생태계를 정리한 것임

## ■ 토양의 범위와 정의

- 지구의 외피인 토양의 범위와 정의는 간단하지도 않으며, 또한 학자들 간의 의견도 시대에 따라 학자들의 분야에 따라 다양하다 (박&최, 2012).
  - Ramann E. (1905).; 견고한 지각의 가장 윗부분을 차지하는 모암의 풍화물과 동식물의 유체로부터 생성된 것
  - Hilgard E. W. (1860); 토양은 식물을 지지하고 양분과 그 밖의 식물생육에 필요한 상태를 줄 수 있는 영성하고 부드러운 물질
  - Dokuchayev V. V. (1897); 천연적으로 물과 공기와 생물의 작용에 의하여 이루어진 풍화생성물로서 표층과 이에 접속되는 층
  - Joffe J. (1936); 토양이란 광물질과 유기물로부터 이루어진 부드러운 천연물이며, 일반적으로 여러 깊이의 층으로 나누어지고 하층과 바탕과는 형태, 이화학적 성질, 성분, 생물 관계 등에 있어서 서로 다른 것
- 또한 토양을 이용하는 각 분야에 따라 토양의 정의는 다르게 나타나고 있으며, 토양학적인 측면에서는 “암석이 물리화학 및 생물학적 작용을 받아 부서지고 분해된 암석의 풍화산물과 이에 기후생물 등의 작용을 받아 변화되며 분해(分解)·부후(腐朽) 되어가는 유기물이 섞여, 자연환경 변화에 평형을 이루며, 토양의 단면을 형성한 자연체로서 공기와 물이 공존하고, 기계적으로 생물의 기반을 지지하며, 양분을 공급하는 등 생물과 무생물의 상호작용이 발생하는 곳” 으로 정의된다.
  - 농임학; 식물의 양분 · 수분 저장과 조절 · 방출, 식물체의 지지물
  - 지질학; 풍화산물 · 풍화맨틀 또는 표토(表土:regolith)
  - 토목공학; 엔지니어링 물질

(나) 토양의 기능 및 생태계서비스<sup>2)</sup>

■ 토양의 기능

- 토양은 인간을 포함한 지구상의 생물이 그 삶을 영위하는 생존의 터전으로 인간은 토양 위에서 인류의 발전을 이루어온 역사를 되짚어 보며, 유럽협의회(Council of Europe, 1990)는 토양의 생태적 특성과 인류의 생존을 위해 보호되어야 할 토양의 기능을 생태적 기능과 인간의 활동에 관련한 기능으로 구분하였다.

<표 3-1> 유럽협의회(Council of Europe, 1990)가 명시한 보호되어야 할 토양의 기능

토양	기능의 소구분	비고
생태적 기능	- 식품, 사료, 재생 가능한 에너지 및 가공하지 않은 재료(raw materials)의 제공 등 바이오매스의 생산(biomass production)	
	- 오염물질의 거름(filtering), 완충(buffering), 저장 및 전달기능	- 토양은 오염물질로부터 먹이연쇄와 지하수를 보호하고 있다. 또한, 토양은 빗물의 저장고 기능을 담당
	- 생물학적 서식지 및 유전물질의 저장	- 토양은 동식물이 살아갈 수 있는 공간과 물질, 생물을 제공 - 유전적 유산(genetic heritage)은 인간의 삶에 필요한 유전물질을 형성
인간의 활동에 관련한 기능	- 물리적인 매체	- 토양은 다양하고 기술적이며 산업화된 구조물과 사회·경제적 활동의 공간적인 토대임. 예를 들면 건물, 도로, 철도 및 여가선용지의 토대임
	- 가공하지 않은 재료의 근원지	- 토양은 물의 저장고이며 여러 형태의 자갈, 모래, 진흙, 이탄(peat), 유류, 광물질을 제공 - CO <sub>2</sub> , 메탄 등 여러 천연가스를 대기 중에 방출
	- 문화적 유산	- 토양은 지구와 인류의 역사를 밝힐 수 있는 고생물학(화석학) 및 고고학적 정보를 포함

자료: 유럽협의회(Council of Europe, 1990); 박&최(2012) 재인용

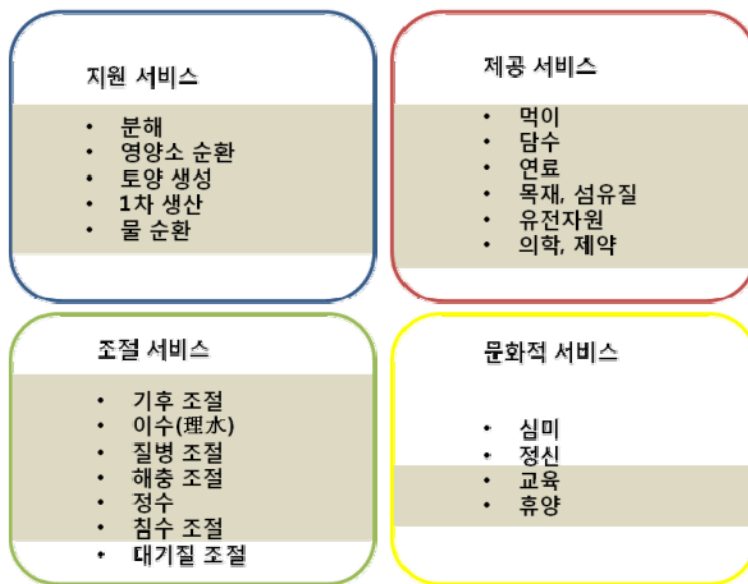
■ 토양의 생태계서비스

- 토양에 거주하는 생물은 먹고, 자라고, 움직이고 있으며, 이러한 행동은 생화학 및 생물리학 과정을 통해 인간을 포함한 생태계에 다양한 서비스를 제공한다 (MEA, 2005).
  - 생태계서비스는 영양물질의 순환, 토양 형성, 토양에서의 물질이동과 저장, 식량 제공, 토양

2) 박&최(2012)의 토양생태계의 구성 및 서비스 내용을 기본으로 토양의 정의와 토양생태계를 정리한 것임

오염물질의 분해 및 제거, 의약품의 제공, 깨끗한 물의 저장 및 제공, 공기의 정화, 토양유실 및 침식방지, 탄소저장, 기후변화 조절, 식물생장과 생물다양성을 지원 등을 말한다.

- 인류의 식량, 천연섬유, 공기, 의약품, 도로 및 건축자재 등을 제공하는 토양생태계 서비스는 직·간접적으로 토양의 생물다양성의 기능과 연결되어 있다.
- 토양의 생물다양성이 기여하는 서비스 형태에 따라 i) 지원 서비스(supporting services), ii) 제공 서비스(provisioning services), iii) 조절 서비스(regulating services), iv) 문화적 서비스(cultural services)로 구분 (MEA, 2005)



자료: MEA(2005); 박&최(2012)에서 재인용.

<그림 3-1> 토양의 생물다양성이 기여하는 생태계 서비스

- EC(2010)는 토양의 기능에 따른 토양의 생태계서비스를 다음 6개로 구분하였다.
- i) 토양 유기물의 순환, 비옥도 및 토양의 형성, ii) 탄소 유출입의 조절 및 기후변화 조절, iii) 물의 순환 조절, iv) 오염물질의 제거 및 생물학적 오염물질 정화, v) 인체 및 동식물의 병원체의 생물학적 방제, 그리고 vi) 의약품의 제공 및 이로 인한 간접 서비스를 통한 인류의 건강 기여

<표 3-2> EC(2010)와 MEA(2005)의 토양기능과 관련된 생태계 서비스

생태계서비스	화학적 엔지니어 <sup>1)</sup>	생물학적 조절자 <sup>2)</sup>	생태계 엔지니어 <sup>3)</sup>
- 토양 유기물의 순환, 비옥도 조성 및 토양 형성	- 모든 기저의 무기물화; 식물의 질소고정과 영양소 흡수(상리공생)	- 미생물 활동 조절	- 서식지의 생성과 선별적 활성화를 통해 경로에 영향
- 물의 순환 - 조절 기능	- 미소응집과 매크로 종합 구조의 통합	- 미생물 활동 조절	- 다짐 및 다짐 해제 기능; 공극성의 규제
- 탄소 유출입의 조절 및 기후변화 조절	- 온실가스 배출 구성요소의 유기물 분해 합성	- 미생물 활동 조절	- 안정적이고 조밀한 구조의 유기물 격리; 호기성 상태 유지
- 오염물질의 제거 및 정화	- 독성이 낮고, 중화로 변화	- 미생물 활동 조절	- 미생물을 이용하여 오염물질의 구조 변경; 소규모로 격리
- 병원체의 생물학적 방제	- 질병의 조절	- 병원체의 확산·조절, 생물군집 수준의 조절	- 병원체의 조절, 일반적인 육식동물의 식량원
- 인류의 건강 기여	- 안정적인 미생물 군집은 인간에 대한 병원균 확산 조절에 도움을 줌 - 화학적 엔지니어는 새로운 제약분자의 원천임	- 미생물 군집 조절	- 수질, 자연재해를 막는 토양 형성 및 유지에 기여(홍수, 산사태 등)

1) 화학적 엔지니어(chemical engineers): 토양에 있는 세균과 진균이 이에 해당. 이들의 주요 기능은 토양에 있는 유기물질을 인간과 동식물이 이용할 수 있는 영양물질 형태로 분해

2) 생물학적 조절자(biological regulators): 소형포유동물과 원생동물(protoists), 선충(nematodes), 톡토기(springtails, Collembola), 진드기(mites), 소형절지류(microarthropods) 등이 이에 해당. 이들은 식물과 다른 작은 동물, 그리고 미생물의 포식자로 이들 화학적 엔지니어의 개체수와 활동을 조절하는 역할을 수행. 이들의 일부는 화학적 엔지니어의 기생 또는 공생기능을 수행함으로써 화학적 엔지니어의 개체수와 활동을 조절. 그리고 식물의 개체수를 조절(EC, 2010).

3) 생태계 엔지니어(ecosystem engineers): 지렁이, 개미, 소형 포유류들이 이에 해당. 이들은 토양입자를 뭉치거나 토양 내에 물과 공기가 흘러갈 수 있는 공간을 만들어 작은 토양생물체들이 거주할 수 있는 공간을 만든다(Jones et al., 1997). 또한 식물의 뿌리는 식물 일부분으로 토양에 정착하여 물과 양분을 흡수하고 뿌리의 분비 물질을 토양으로 내보내는 과정을 통해 토양의 구조를 변화(DEFRA, 2009).

자료: EC(2010); MEA(2005); 박&최(2012) 재인용

## ■ 토양 유기물의 순환, 비옥도 조성 및 토양 형성

○ 토양에 함유하고 있는 유기물과 영양분을 적절하게 재활용함으로써 식물의 성장과 작물의 생산성을 지원한다( EC, 2010).

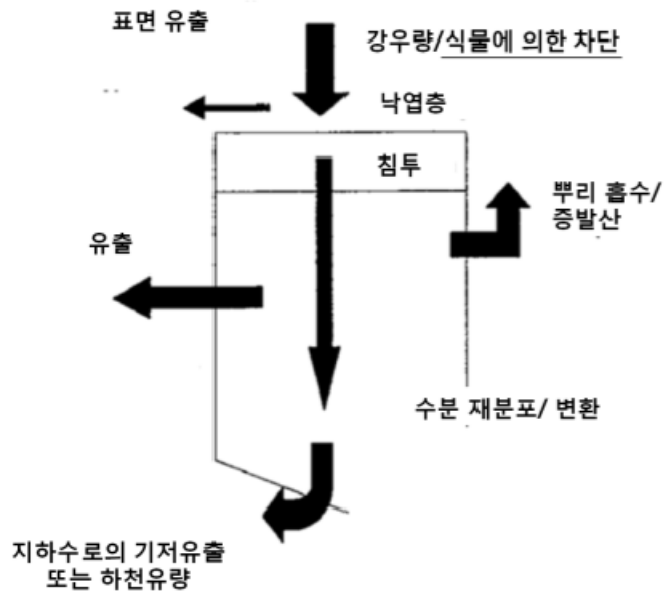
- 토양비옥도에 대한 토양 생물의 기여는 인류 사회에 중요한 식량과 임산물을 제공한다.

- 지원서비스: 토양은 식물생산과 토양형성 등 생태계서비스를 지원하는 유기물질의 순환과 유기물질을 분해

- 제공서비스: 토양은 곡물, 과일과 채소 등을 생산. 1차 생산자인 식물은 탄소동화작용을 거쳐 산소를 방출하고 식물은 호흡을 통해 토양으로부터 얻은 물을 대기 중에 방출하는 과정을 거쳐 물을 순환시키고 간접적으로 기후조절에 기여

## ■ 물의 순환 조절 기능

- 토양의 물순환 서비스는 물을 지하수로 저장하는 기능을 포함하며 물의 양과 질을 조절한다 (Bardgett et al., 2001).
- 빗물, 눈, 이슬 등은 토양에 집적되는 물의 주요 원천이며, 이 물은 여러 경로를 거쳐 토양에 도달하며 지하수로 저장된다.



자료: Bardgett et al.(2001); 박&최(2012) 재인용

<그림 3-2> 토양에서의 물의 이동 경로

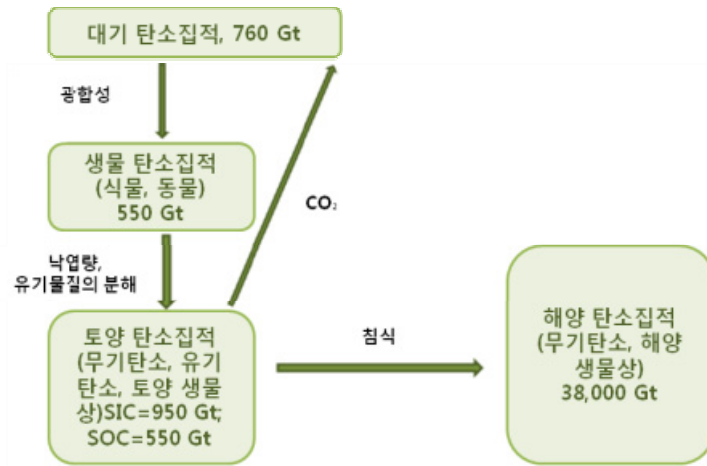
- 토양의 식물 피복은 물의 토양 침투력을 증가시키며, 이 과정은 결과적으로 토양의 물이 지하수로 저장되는 능력을 증가시킨다 (Bardgett et al., 2001).
- 토양 표면에 식물이 피복되어 있지 않을 경우, 물은 토양의 표면을 따라 흘러가며, 이는 토양의 침식율을 증가시키게 된다.
- 식물뿌리는 토양입자가 물과 함께 이동하는 것을 억제하고, 토양입자를 더욱 단단하게 뭉치게 하여 침식을 방지한다.

- 미국의 경우, 식물로 토지 피복이 되어 있지 않은 지역은 피복이 되어 있는 지역에 비해 무려 123배 이상으로 토양 침식이 발생한다 (Piementel & Kounang, 1998).
  - 식물로 피복되어 있는 토양의 경우 토양유실은 1년에 0.1ton/ha 이하로 일어나는데, 미국 몬태나(Montana)와 유타(Utah) 주에서는 토양의 식물 피복이 100%에서 1% 이하로 낮아질 때, 토양의 침식은 200배 이상 크게 증가하였다 (Piementel & Kounang, 1998).
- 토양이 침투되는 과정을 통해 물은 정화되며, 오염물질과 병원성 미생물은 토양입자에 의해 걸러지고 깨끗하고 안전한 지하수로 저장된다.
- 토양에 물이 침투될 때, 다양한 물리·화학적인 과정이 일어난다.
    - 침전, 강수, 산화와 환원, 수착(sorption)과 탈착(desorption), 이온교환, 오염물질의 생분해 등을 거쳐 오염물질과 병원성 미생물이 토양에서 걸러지고 제거된다.
- 토양에 침투된 물은 지하수로 재배치되며, 물의 재배치는 토양의 생태계 엔지니어에 의해 만들어진 공극의 특성에 따라 달라진다 (Bardgett et al., 2001).
- 토양의 식물에 따라 물의 이동성이 달라지며, 토양 공극에 따라 물의 보유시간이 다르게 나타난다.
    - 토양에서 대기로의 물의 이동(evapo-transpiration)은 토양에 살고 있는 식물과 뿌리의 생물량(root biomass)에 따라 달라진다.
    - 물의 공극이 적을수록 물을 보유하는 시간이 길어지게 되고, 이 때문에 식물이 이용할 수 있는 지하수의 양이 많아지게 된다 (Bardgett et al., 2001).

## ■ 탄소 유출입의 조절 및 기후변화 조절

- 토양의 생물다양성은 지구의 탄소를 토양에 집적시킴으로써 기후변화 조절기능을 수행한다 (EC, 2010).
- 토양에는 탄소가 유기물질의 형태로 있으며, 토양의 유기물질은 분해되어 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 대기 중에 방출된다.
    - 토양은 지구상에 해양 다음으로 큰 탄소의 집적소(carbon pool)로 토양 1m<sup>3</sup>에는 약 2,500Gt의 유기물질 형태의 탄소가 포함되어 있다.
    - 이중에서 유기탄소는 1,550Gt이며, 무기탄소는 950G으로 이는 생물 내에 축적된 탄소량(550Gt)의 4배가 넘으며, 대기 중 탄소량(760Gt)의 약 3배에 해당된다.
  - 황상일 등(2010)에 따르면, 우리나라의 토양에는 6,437.44톤의 탄소가 저장되어 있으며, 텍

지개발 등의 토지이용 변화가 있을 경우에는 2,443.08톤으로 약 2.7배인 3,994톤의 토양 탄소량이 감소할 것으로 추정하였다.



자료: EC(2010); 박&최(2012) 재인용

<그림 3-3> 지구에서 토양탄소의 흐름

- 토양의 생물다양성은 CO<sub>2</sub>의 순환과정을 통해 이산화탄소 외에 메탄(CH<sub>4</sub>)과 질소가스(N<sub>2</sub>O, nitrous oxide)의 방출을 조절한다.
- 이들 가스의 양은 CO<sub>2</sub>보다 적으나 동일한 단위량이 온난화에 미치는 영향은 CO<sub>2</sub>에 비해 CH<sub>4</sub>의 경우는 21배, N<sub>2</sub>O는 310배 이상에 해당한다 (Schils et al., 2008).

### ■ 오염물질의 제거 및 생물학적 정화

- 토양은 토양에 존재하는 생물다양성의 힘으로 오염물질을 제거하거나 오염물질의 화학구조를 변화시키거나 분해, 특성 등을 변화시킴으로써 오염물질을 생물학적으로 정화(bioremediation)한다 (EC, 2010).
- 오염부지의 생물학적 정화는 미생물 또는 식물에 의해 이루어지며, 미생물에 의해 오염물질을 유기물질로 변화시키는 과정을 일반적인 생물학적 정화(bioremediation)라 한다.
  - 생물학적 정화중에서 식물을 이용하여 오염물질을 토양에서 제거하는 것이 식물학적 정화(phytoremediation)라 한다.

## ■ 인체 및 동식물 병원체의 생물학적 방제

- 토양의 생물다양성은 토양에 유입되는 병원체에 직·간접적으로 영향을 미치고 있다.
  - 생물다양성이 높은 토양에서는 유해 미생물 또는 선충 등이 동식물에 병원력이 높지 않다.
    - 더욱이 자연적으로 다양한 생물이 존재하는 경우에는 병원성 미생물의 확산력이 크지 않다 (Altieri & Letourneau, 1982; Lavelle et al., 2004).
  - 토양의 병원성 미생물인 뿌리혹선충(root knot nematodes)의 경우, 다양한 작물이 재배되고 있는 지역에서는 병원성이 높게 나타나지 않으나, 단일작물이 재배되는 경우, 즉 토양의 생물다양성이 낮은 경우에는 그 단일화 된 작물에 병원성이 높게 나타나는 경우가 나타나고 있으며, 이로 인해 재배작물은 뿌리혹선충의 피해를 보고 생산성이 크게 낮아진다 (Kerry & Crump, 1998; van der Putten et al., 2006).

## ■ 의약품질의 제공 및 이로 인한 간접 서비스를 통한 인류 건강에의 기여

- 토양미생물은 새로운 의약품의 원천이 될 수 있으며, 토양의 미생물 종류와 개체가 줄어들어 가는 것은 이러한 새로운 의약품을 얻을 기회를 줄어듦을 의미한다.
  - 토양미생물 다양성이 높은 토양은 화학적이고 유전적인 의약품의 중요한 원천이다.
    - 1928년 토양 진균인 *Penicillium notatum*으로부터 추출한 인류 최초의 항생제인 페니실린과 1944년 *Streptococcus*로부터 추출한 항생제인 스트렙토마이신에 의해 많은 사람이 세균 감염으로부터 벗어난다.
    - 최근에도 여러 항생제가 토양미생물로부터 추출 및 연구되고 있으며, 이들 항생제에 활용은 인류를 병원성 미생물로부터 혜택을 받게 될 것이다.
- 토지의 이용용도 변경 등을 통한 토양 생물다양성의 훼손은 인간의 건강에 간접적으로 큰 영향을 미치게 될 것이다.

## (2) 지하수의 정의 및 기능

### (가) 지하수의 정의 및 지하수 의존 생태계

#### ■ 지하수의 구성 및 지하수 의존 생태계

- 지하수는 땅속에 있는 물을 총칭하며 물 순환(water cycle)의 일부로 전세계 담수의 약

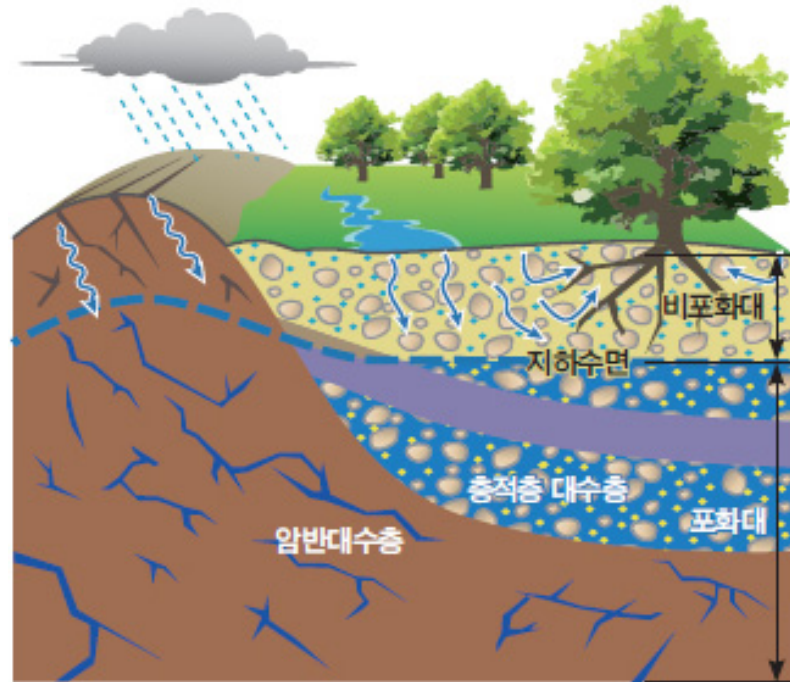
30%를 차지한다.

- 강수량의 일부가 지표면 아래로 침투하면서 토양을 통과하여 토양입자 수분의 형태로 존재하거나 토양입자 사이를 채우고, 더 깊이 침투하면 이미 지하수면 아래 물과 공기로 포화되어 있는 대수층에 도달하여, 암석입자와 암석의 균열 및 균열 사이의 공간(공극)을 채우면서 대수층을 형성하게 된다.
- 지하수는 각종 지각의 구성 물질과 접촉하고 있는 용매(solvent)로, 토양 및 지질(암반)의 구성 물질이나 물리적 환경(온도, pH 등)에 따라 용존 물질의 차이가 발생하고, 이러한 차이는 해당지역의 지하수 수질(groundwater quality)을 결정하게 된다.
- 지하수는 인간의 직접적인 이용 뿐 만아니라, 지표면 아래에 접촉하고 있는 토양생태계의 기능을 조절하고, 지표면 위의 수상 및 육상 생태계를 유지하는데 중요한 역할을 한다.
  - 땅속에 저장된 지하수가 지표로 유출되는 현상인 기저유출(baseflow)을 통해 주변 하천과 호소의 유량에 기여하고, 습지 및 식물 군락지, 수변 식생 등이 자연적으로 지표로 유출되는 지하수로부터 영양분을 공급받는다. 이때 지하수의 고갈은 지하수위 감소와 관련 생태계의 파괴, 생태계서비스의 감소와 직·간접적인 연관성을 나타내고 있다.
  - 지하수의존생태계(GDE, Groundwater-dependent ecosystems)는 구조 및 기능면에서 지하수 대수층으로부터의 물과 영양 공급을 의존하는 수상 및 육상생태계를 말한다 (Batubara et al., 2014; 강형식 외(2015) 재인용).
  - 국내에서는 “지하수 의존 수생태계”로 명명하고, “지하수에 의해 생태환경의 물리적·생물학적으로 영향을 받는 하천 또는 강, 습지 등의 지하수위가 지표수위보다 높은 경우 지하수의 유출에 의존하는 생태계”로 정의하고 있다 (현운정 외(2011); 강형식 외(2015) 재인용).

## ■ 지하수의 범위와 정의

- 국내 「지하수법」에 따른 “지하수”는 지하의 지층(地層)이나 암석 사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물 “로 정의하고 있다.
  - 상기 정의는 기반암내에 흐름이 없는 물(심층 지하수 등)이나 토양입자나 간극에 포획되어 있는 물, 하천이나 해양으로 유출되는 지하수, 그 지하수로부터 유지하는 생태계 등을 설명하고 그 기능을 확장하기 다소 어려움이 있다.
- 국외에서 지하수 정의는 얇은 대수층을 통해 흐르는 물뿐 아니라, 토양 수분, 영구 동토(동토), 매우 낮은 침투성 기반암에 있는 움직이지 않는 물 및 심층 지열 또는 오일 형성을 위한 물을 모두 포함하고 있다 (Wikipedia, 2017).

- 상기와 같이, 지하수는 구성 물질(성분)의 성격을 갖는다면, 대수층(Aquifer)은 지하수를 함유한 층으로, 지층 중에서 투수성이 있으며 물로 포화되어 있고 상당양의 물을 배출할 수 있을 만큼 충분한 투수성과 수리적 연속성을 가지고 있는 지층(예, 미고결 상태의 모래나 자갈 등으로 이루어진 지층) 즉, 물리적 환경(매질, 매체)의 성격을 갖고 있다.
- 지표면에서 불투수층 사이의 공간은 물이 포함된 양에 따라, 위에서부터 아래로 통기대(비포화대), 지하수면, 포화대(충적층, 암반), 불투수층으로 구성된다.



자료: 국가지하수정보센터 (2017)

<그림 3-4> 지하수를 보유하고 있는 매체의 분류 체계

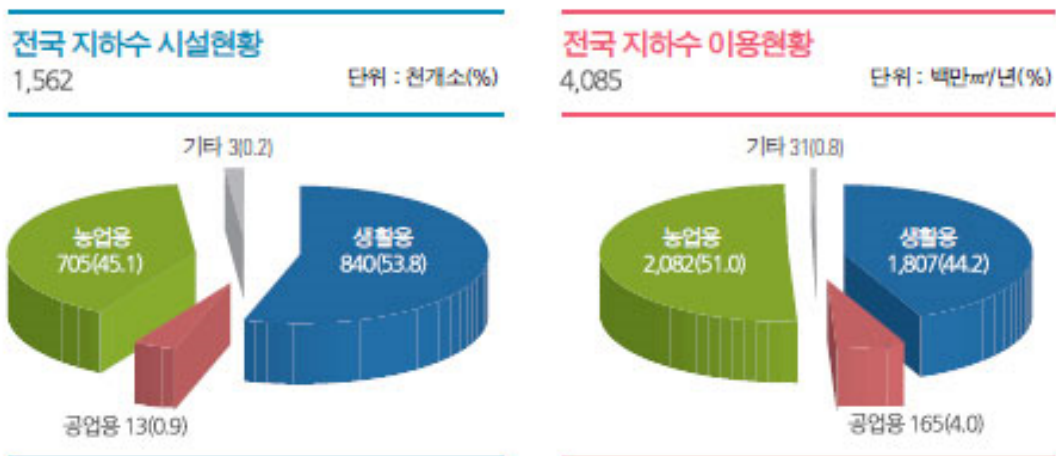
## (나) 지하수의 기능

### ■ 지하수의 기능과 자원·환경적 가치

- 지하수는 그 기능에 따라 자원적, 환경적, 기타 사회문화적 가치를 갖는다. 자원적 가치를 가지는 지하수의 기능은 물이용 또는 물안보(잠재적물이용), 하천기저유량 제공, 지열에너지 활용 등이 있으며, 환경적 가치에는 기반안전성 유지, 생태계 보전 및 생물다양성 유지 등이 있으며, 사회문화적 가치로는 폭포 등 문화관광자원 제공과 인류 건강에의 기여 등을 들 수 있다 (현운정 외, 2014).

## ■ 지하수 이용과 물안보 확보

- 전 세계적으로 대부분의 나라에서의 수자원총량 대비 지하수 이용량 비율은 20% 이내로 사용한다 (IGRAC<sup>3)</sup>, 2014: 현윤정 외, 2014에서 재인용).
  - 아프리카 등의 일부 국가에서는 수자원총량의 60% 이상을 지하수에 의존하고 있다.
  - 지하수는 음용수, 농업용수, 생활용수, 공업용수 등 다양한 용도로 활용되나, 지표수에 비해 수질의 양호함 때문에, 대부분 음용수로 이용된다.
- 우리나라는 2013년 기준 연간 총 강수량(1,297억㎥/년) 중 약 14.5%(188.4억㎥/년)가 지하로 함양되는데, 이 중 3%(37억㎥/년)만이 직접 이용된다 (한국수자원공사, 2014).
  - 국내 총 용수이용량 333억㎥ 중에서 지표수 공급량은 269억㎥(88.4%), 지하수공급량은 37억㎥(11.1%)이고, 지하수 개발가능량(129억㎥)의 28.4% 정도에 지나지 않다.
  - 전국 지하수 시설은 약 156만개이며, 연간 40.8억㎥(2014년 기준)을 이용하고 있으며, 이 중 생활용수 관련 시설이 많지만, 실제로 지하수 이용량은 농업용수가 더 많다.



자료: 국가지하수정보센터 (2017)

<그림 3-5> 지하수 시설수 및 이용량(2014년 기준)

- 우리나라에서 지하수 이용은 상수도 공급 및 레저시설, 비상급수시설 등을 통해, 생활용수, 공업용수, 농업용수로 직접적인 이용과 먹는샘물과 온천 등으로 직접적으로 이용되고 있다. 지하수는 빗물에 의해 채워지기 때문에 적절하게 이용하면 지속적으로 재생가능한 자원이므로 그 이용가치가 높다.

3) 국제 지하수자원 평가센터(International Groundwater Resources Assessment Centre, IGRAC)

- 상수도 공급에서 지표수는 많은 양을 공급할 때 유리하지만, 소규모 개발에는 지하수가 더 경제적이다.
- 특히 가뭄, 방사능 누출 등 긴급한 재난 발생 시 지하수를 먹는물로 직접 이용하거나, 지표수가 부족할 때 비상용수로 대체 활용 가능하다.

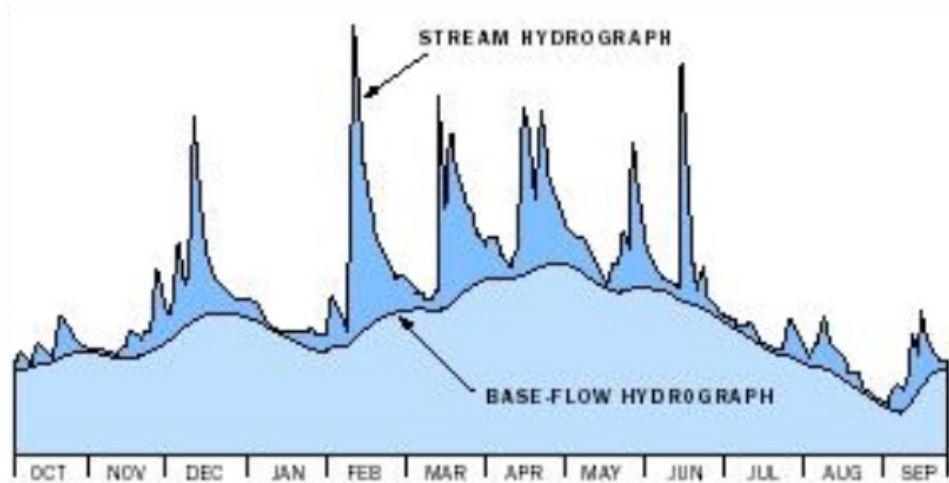
## ■ 지열에너지 이용

- 최근 온실가스 감축을 위한 신재생에너지의 개발·이용으로, 지하수는 연중 일정 온도(약 15℃)를 유지하는 특성과 지열을 보유하고 있는 특성으로 지열냉난방시스템, 지열발전소 등으로 이용되고 있다.
  - 우리나라 지열냉난방 보급은 증가 추세이다 (송운호, 2012).
- 프랑스, 미국 등 세계 여러 나라에서는 지하의 뜨거운 열(지하 수 km에서는 온도가 100℃ 이상임)을 이용하여 지하수의 수증기로 증기터빈을 돌려 전기를 생산한다 (국가지하수정보센터, 2017).
  - 지열에너지로의 이용은 원자력, 태양열 등의 에너지 이용보다도 적은 면적으로도 에너지 생산이 가능하며, 온실가스 및 환경오염물질 생성이 없다는 장점을 갖는다.
    - 전력 1GW 생산에 필요한 땅 면적: 지열(900㎡ 이하) < 원자력(1,200㎡) < 태양열(3,200㎡) < 석탄(5,700㎡) < 태양광(7,500㎡)
  - 우리나라는 국내 최초로 포항에 지열발전소를 건설에 착수해서, 2017년 12월 준공을 목표로 하고 있다. 땅속 4km 이상 되는 깊은 곳에서 160~180℃의 화강암 지층에 함유되어 있는 지하수의 증기를 이용하여 전기를 생산할 예정이다.

## ■ 하천기저유량 제공

- 갈수기에 하천유량은 거의 100%가 지하수의 기저유출에 의해 유지되고, 평시에도 하천유량의 30~40%가 지하수 기저유출에 기인한다 (현운정 외, 2014).
- 낙동강유역을 대상으로 기저유출을 산정하면, 하천의 유량 중 약 40%로 나타남. 강수가 적은 봄과 겨울철은 약 70% 이상의 기저유출률을 보이는데, 특히 1월의 경우, 90% 이상의 값을 나타낸다 (강형식 외, 2015).
- 하천은 지하수의 기저유출로 인해 하천유량이 유지되는 이득하천이 형성되거나, 반대의 손실하천이 형성되는 구간은 지표수-지하수가 연계되는 구간(지표수-지하수 혼합대)에

해당하는데, 하천과 지하수의 상호작용은 갈수기에 하천유량 조절 뿐 아니라, 지하수의존 생태계(GDE) 발달, 수생태계 유지, 수질 조절, 하천의 수온 조절 등에도 기여한다.



자료: Water Encyclopedia (2017.2.21.)

<그림 3-6> 하천유량과 기저유출량의 상대비율

### ■ 지반의 안전성 확보

- 지하수는 땅 속의 공극을 채우고 있어, 지하 암석의 응력과 함께 지상에서 가해지는 외부 압력에 대해 평형을 이루면서 지반의 안전성을 확보한다 (현윤정 외, 2014).
  - 지하수는 재충전 속도가 느려 한번 고갈되면 회복이 힘들기 때문에, 과도한 지하수 개발이나, 지하공간 개발로 인한 주변지하수의 유출은 원지반의 지하수위를 하강시켜 토양입자를 느슨하게 해서 견고한 지층을 연약지반으로 변형시키거나, 지반침하(land subsidence)로 나타나기도 한다.
  - 따라서, 지하수는 직접적인 이용이 아니더라도 지하에 적정한 양의 부존상태만으로도 지반의 항상성을 유지시켜주는 환경적 가치를 가진다 (현윤정 외, 2014).

### ■ 생태계 보전 및 생물다양성 유지

- 지하수가 기저유출로 하천의 유량을 유지하는 기능은 강 또는 하천, 호소의 건천화를 방지함과 동시에 수생태계 유지에 필요한 유량을 공급함으로써 수생태계를 유지, 보존이 가능하게 한다 (현윤정 외, 2014).
- 지표수와 물리화학적 특성이 다른 지하수가 하천이나 호소 등으로 유출되면서 그 경계부

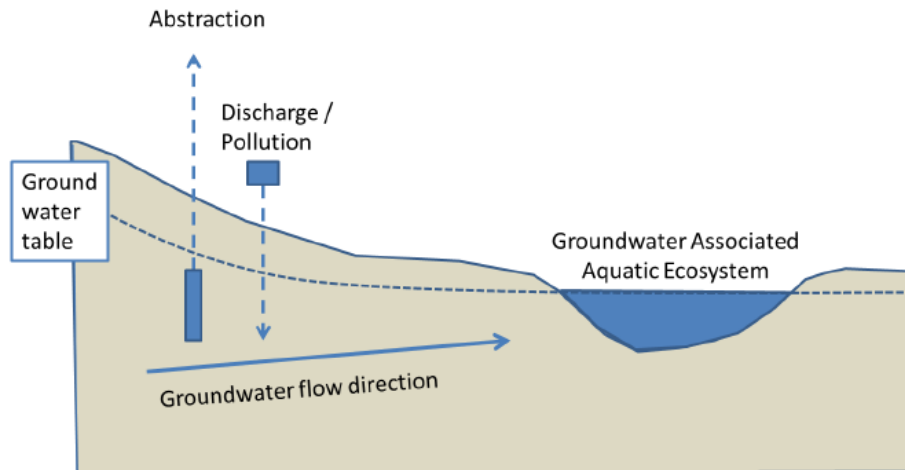
에 지표수-지하수 혼합대가 형성되고 지표수-지하수 혼합대는 수량 및 수질, 수온 조절 외에 활발한 물질순환이 일어나면서 생태학적 추이대(ecotone)가 된다 (현윤정 외, 2013).

- 낙동강유역의 기저유출 변화에 따른 수생태계(환경부의 수생태건강성지수)와의 관계를 보면, 저서성 대형무척추동물과의 상관성이 있고, 서식수변, 어류, 부착조류는 상관성이 없는 것으로 나타났다 (강형식 외, 2015).



자료: 국가지하수정보센터 (2017.2.21.)

<그림 3-7> 지하수로 인한 지반침하 사례



자료: EC (2015)

<그림 3-8> 지하수 의존 수생태계 개념도

■ 먹는샘물, 문화관광자원 제공 및 이로 인한 간접 서비스를 통한 인류 건강에의 기여

- 전세계적으로 안전한 먹는 물로서 고부가가치 가능성이 많은 먹는샘물(병물)의 원수가 대부분 지하수이다. 먹는샘물은 미네랄이 풍부한 깨끗한 물에 대한 인간의 욕구를 충족하고, 그 수요 역시 증가될 것으로 예상된다.
- 온천은 인류역사상 오랫동안 이용해온 문화관광자원임. 온천은 지하수 수온이 그 지역의 지열의 정도나 용존물질의 차이에 따라 다르고, 나라마다 정의가 다르다. 온천은 인간의 문화관광자원으로서의 역할이 주였다면, 근래에 와서는 대체에너지인 지열발전의 개발이 시작되면서, 지하수 자원의 경제적 가치도 부각되고 있다.
- 또한 폭포나 해안지역에서의 용출수를 이용한 레저시설 등 지하수를 관광자원으로 활용하기도 하는데, 우리나라 제주도의 천지연 폭포, 천제연 폭포, 정방 폭포, 문수물, 논짓물 등이 이에 해당한다 (현윤정 외, 2014).

### (3) 토양·지하수 환경의 변화

#### (가) 위협요인

- 토양의 생물·물리·화학적 특성을 변화시켜 토양의 질을 위협하는 요인은 화학물질에 의한 오염, 침입외래종, 유기물질의 고갈, 침식, 염화(salinisation), 토지 표면의 다짐(compaction) 및 차폐(sealing) 등 다양하다.
  - 최근 토양 질의 변화는 산업화 등에 의한 유류와 유해 화학물질의 사용량 증가 및 토양으로의 유출 등과 더불어 토지의 이용변화, 기후변화 등이 주요 요인으로 제기되고 있다.
- 다양한 사회, 경제, 환경의 변화가 지하수와 지하수 환경에 대한 위협 요인으로 작용한다.
  - 인구증가로 인한 생활용수와 음용수 수요가 증가하면서 지하수 개발·이용의 수요도 증가하였고, 도시개발로 인해 지하공간 이용이 증가하면서 지하환경의 훼손과 오염이 가중되었고 이로 인해 생태계의 건강성 훼손, 환경복지 사각지대 발생 등의 영향을 초래하였다. 또한 기존 시설들의 노후화로 인해 지중사고(화학사고, 오염물질 유출 등) 우려가 증대하고 브라운필드에 의한 오염 우려가 증대되었다.
  - 산업활동의 증가는 산업용수 수요 증가, 오염사고 발생 가능성 증가로 이어졌고, 글로벌화와 친환경정책, 보건생명 고령화 사회에 부합하는 고부가가치 산업으로서 먹는샘물 등 산업 육성, 저성장 사회에 맞춘 물값 현실화 정책으로 인한 지하수의 난개발 우려가 증가되었다.
  - 기후변화는 가뭄과 홍수 등 재난·재해의 위협을 증가시키고, 이러한 위협은 물 공급의 안정성(물안보)에 영향을 가하게 되었다.
    - 지역 간·국가 간 양질의 물 공급서비스의 격차가 발생하고, 물 스트레스로 인한 이해관계의 충돌이 발생하였다.
    - 해수면 상승과 더불어, 해안지역의 지하수 고갈(지하수위 저하)은 담수대수층으로의 염수침입 등을 유발하여, 지하수 자원 가치의 저하가 우려된다.
    - 전세계적인 온실가스 감축 요구로 이산화탄소 지중 저장(CCS) 시설의 설치와 신재생에너지(지열, 원자력 등)의 개발·이용 증가로 인한 2차적 지하수 환경의 오염 유발 가능성이 우려되고 있다.

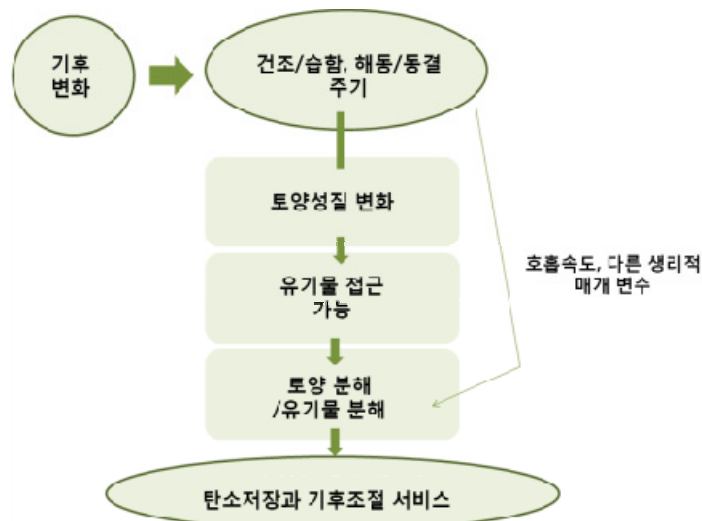
## ■ 오염물질에 의한 토양·지하수 오염

- 산업구조의 고도화로 화학물질의 종류와 양이 다양해지고 많아졌으며, 향후 토양 및 지하수오염물질의 종류와 양도 많아질 것으로 전망한다.
  - 전 세계적으로 8천8백만 종의 화학물질이 개발되어 있으며, 현재 유통되고 있는 화학물질의 수는 12만 여종에 이르고 있으며, 매년 2천 여종의 새로운 화학물질이 개발되어 상품화되고 있다 (환경백서, 2015).
  - 국내에서 유통되는 화학물질은 약 4만4천여 종이며, 매년 300여종의 화학물질이 새로이 국내 시장에 진입하는 등 화학물질의 사용이 증가하고 있다 (환경백서, 2015).
- 우리나라는 유류 등 에너지 소비량 증가, 반환 미군기지 환경오염 및 군부대 토양 오염, 폐광산 및 산업단지 토양오염, 폐기물 발생량 증가, 유해화학 물질 사용증대 등으로 인한 토양과 지하수 오염의 심화되고 있다.
  - 2013년 조사결과, 국내 석유류의 제조 및 저장시설 전체 22,583개소 중 8,588개소를 수시 또는 정기검사 결과 242개소 업소(2.8%)가 토양오염우려기준 초과하였다 (환경백서, 2015).
    - 토양오염우려기준 초과 시설중에서 주유소가 5,923개소 중에서 196개 업소, 산업시설은 1,580 업소중 25개 업소, 기타시설은 964개 업소 중에서 18개 업소가 초과하였다.
  - 2014년 기준으로 폐금속광산 2,428개소이며, 2014년까지 조사가 완료된 1,210개 폐금속광산 중에서 601개소의 폐금속광산 및 주변 토양과 하천 및 저질토 등의 오염이 확인되었다 (환경백서, 2015).
  - 2014년 기준 토양오염실태조사 지역 2,460개 지역 중, 16개 지역에서 지하수 오염을 보이고 있다.
  - 2014년 기준으로 지하수 수질측정망 운영 결과, 총 조사시료 6,540개 중 7.9%인 514개가 수질기준을 초과했다 (환경백서, 2016).

## ■ 기후변화

- 토양은 지구에서 탄소를 저장하는 두 번째 큰 창고이며, 기후변화는 토양의 탄소 저장 능력에 영향을 미치고 있다.
  - 기후변화는 토양에 서식하는 미생물의 군집과 활성을 변화시키고 있으며, 토양의 유기물질 등으로 축적된 탄소의 대기 방출 순환시스템에 직접적인 요인으로 작용한다.

- 또한 기후변화는 식물의 탄소동화작용, 토양침식 등과 연계하여 영향을 준다.
- 기후변화에 따른 토양의 건조·습함, 해동·동결 주기의 빈도 변화는 토양의 성질을 변화시킨다 (Berntson & Bazzaz, 1997).
- 토양의 미생물이 접근하고 이용할 수 있는 유기물질의 종류와 양이 변화되며, 이로 인해 미생물 군의 변화가 나타나며, 기후변화는 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 이용하는 토양 생물의 다양성에 영향을 미치게 된다.
- 기후변화에 따라 산림 토양에서 식물생장에 필요로 하는 질소 유효량이 변화하며, 이는 토양미생물에 의한 질소의 무기화를 증가시킨다 (Horz et al., 2004).



자료: EC(2010).; 박&최(2012) 재인용

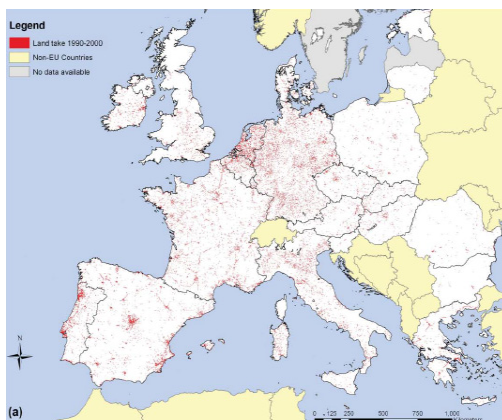
<그림 3-9> 기후변화와 토양의 탄소저장과의 관계 모식도

- 기후변화는 가뭄과 홍수 등의 빈도 증가로 인해 수자원 관리의 어려움을 야기하며, 이는 지표수와 지하수의 수량·수질 관리에 위협 요소로 작용한다.
- 미래 가뭄의 발생빈도 및 심도는 지역적 차이가 있으나 전반적으로 증가할 것으로 전망되며, 가뭄의 계절별 경향에 따르면, 봄철과 겨울철의 가뭄현상의 심화될 것으로 전망된다 (환경백서, 2016, p.46).<sup>4)</sup>
- 한반도 지표 유출량은 미래로 갈수록 증가하는 반면, 지하수 함양량은 줄어들 것으로 전망하고 있다 (환경백서, 2016, p.46).

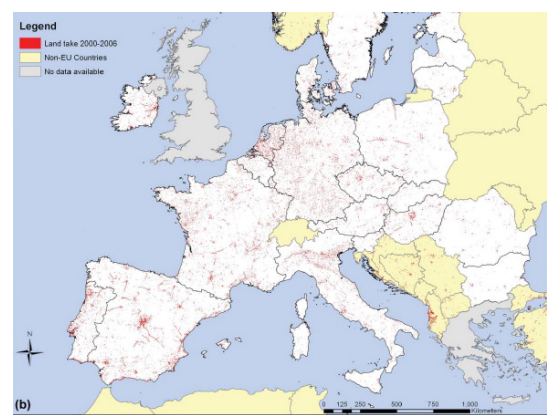
4) 환경부, 2017,

## ■ 토지의 이용 변화

- 토지 이용형태의 변화는 토양에 서식하고 있는 생물의 서식처를 변화시키고(Bardgett & Cook, 1998), 농업의 잠정적인 생산 손실을 야기시킨다 (Gardia et al., 2015).
- 1990-2000년 기간 중 EU 21개국에서 사용이 변경된 농경지는 752,973 ha이었으며, 2000-2006년 기간 중 436,095 ha. 이는 해당기간별 전체 EU 사용변화부지의 70.8%와 53.5% 해당한다.
- 이는 EU 19개국 (21개국 중에서)의 1990-2006년 기간 중 6백만 톤의 밀 생산량 손실에 해당한다.



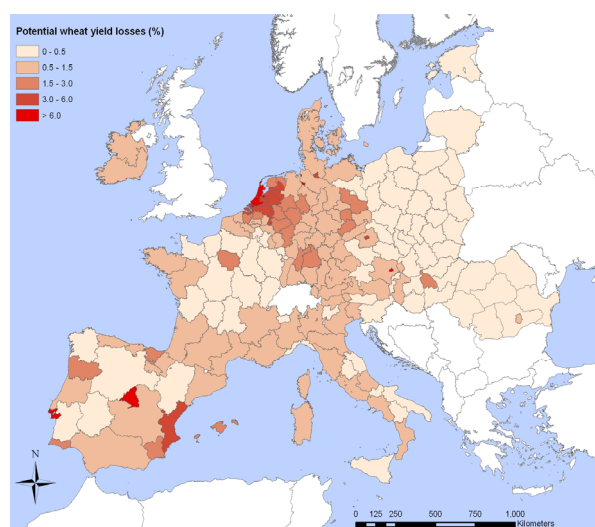
(a) 1990년-2000년



(b) 2000년-2006년

자료: Gardia et al. (2015)

<그림 3-10> EU 21개국의 농경지 이용 변화: 1990-2000(a), 2000-2006(b)



자료: Gardia et al. (2015)

<그림 3-11> EU 21개국의 농경지 이용 변화에 따른 밀생산 감소

- 산림의 변화는 나무에 서식하고 있는 진균과 세균, 그리고 작은 무척추동물들의 서식처를 변화시킨다.
- 초지의 이용 형태 변화 또한 전혀 다른 형태의 생물다양성으로 나타남. 특히 도시 지역의 토양의 생물다양성은 새로운 형태로 나타난다 (Helgason et al., 1998).
- 우리나라 국민의 90% 정도가 도시 지역에 거주하고 있으며, 이는 점차 증가하여 2020년에는 95%에 이를 것으로 보고 있다 (국토해양부, 2011).
  - 이미 국토의 15%가 도시 지역으로 이용되고 있으며,
  - 도시 지역의 토양은 대부분 건물과 포장된 도로로 폐쇄되었고,
  - 토양의 다짐으로 인하여 토양 본래의 서비스 기능이 이미 훼손되어 있는 상태이다.
- 도시의 대기 오염, 중금속류의 이용에 따른 토양부지의 오염, 도시의 열섬효과에 의한 기온 변화 등은 토양의 물리 화학적 균형 상태를 변형시키고 있다 (Hansen et al., 2002; McDonnell et al., 1993).
  - 도시지역에 남아 있는 나무와 초지, 호수 주변 등의 자연환경 공간의 토양조차도 본래의 물리 화학적 성질이 변화되어 있다.
- 토지이용의 변화는 토양차폐, 압밀 등의 지표면의 변화를 야기하며, 이는 지하수 함양량을 저하시키는 요인이 된다.
- 가축매몰지 조성은 침출수로 인한 토양·지하수의 오염이 야기되며, 지속적인 환경관리를 요구하는 위협요인에 해당한다.
  - 2010년 11월 29일부터 구제역이 전국적으로 발병하여 소와 돼지 등 가축매몰지가 대규모 (4,799개소)로 생겨나고 침출수로 인한 지하수 등 2차 환경오염에 대한 국민적인 우려가 확산되고 있다 (환경백서, 2016).

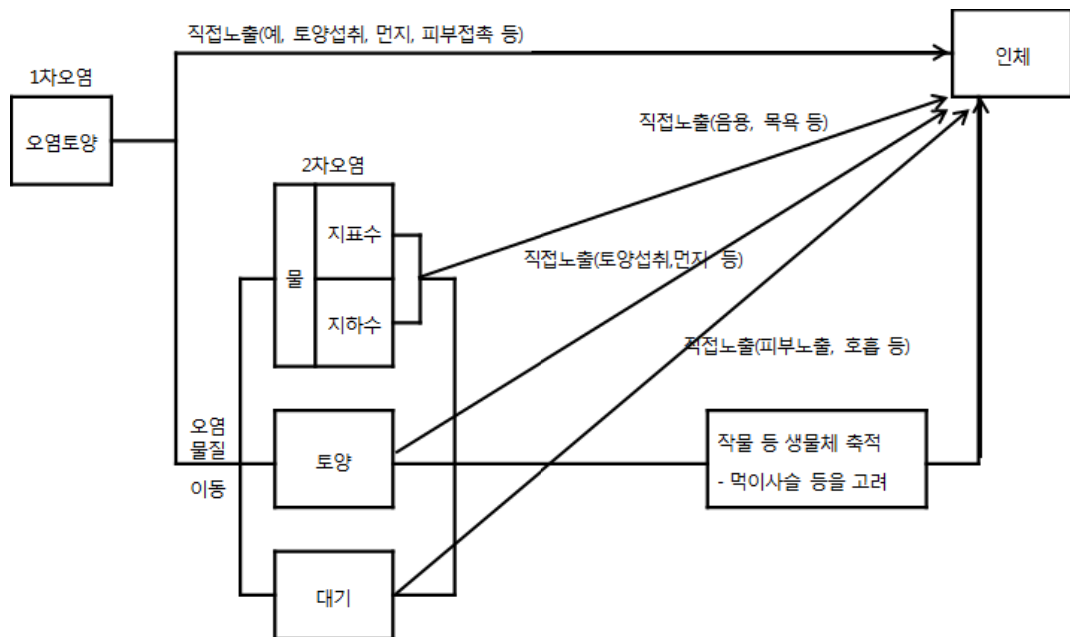
## (나) 토양·지하수 환경질의 저하

### ① 토양

#### ■ 토양오염

- 산업의 발전에 따라 다양한 종류의 폐기물이 토양에 누적되기 시작하였으며, 농작물 생산을 목적으로 사용되고 있는 화학비료와 농약 등도 토양오염을 가중시킨다.

- 수질오염과 대기오염 등을 통하여 토양오염이 발생하고 인체 및 생태계를 훼손하였다.
- 미국과 유럽지역 국가들의 경우, 1980년대 이후 다수의 잠재적 토양오염부지가 예측되었으며, 이 중에는 토양오염이 확인되어 정화를 수행한바 있다.
  - 유럽 국가(EEA 33개 회원국과 6개 협력국)에서 250만개소의 잠재적 오염부지가 존재하고, 이 중 14%인 34만 개소의 부지는 정화가 필요한 오염부지일 것으로 예측되었다 (van Liedekerke et al., 2014).
- 우리나라는 20세기 중반 이후 국토이용 형태로 변화되면서 토양오염을 유발할 수 있는 광산, 금속제련소, 유류 및 유독물 등의 저장·수송·유통 및 이용, 폐기물 저장 및 매립 시설 등, 공업단지 시설 등의 증가와 토양오염 유발원 등이 증가하면서 1990년대 중반 이후 잠재적 토양오염부지가 다수 발견됨에 따라 오염부지의 정화사업을 수행해왔다.
  - 국내 폐기물매립지, 유류 및 유해화학물질 제조·저장시설, 광산지역, 산업단지지역, 군부대지역에서 오염부지 개소는 >6,330개소 ~ >6,630개소(석탄광산 제외된 현황) 정도이다 (환경부, 2013).



자료: 박용하 외(2003)

<그림 3-12> 토양오염에 의한 생태계 훼손 경로

<표 3-3> 우리나라의 주요 토양오염시설에 의한 오염부지

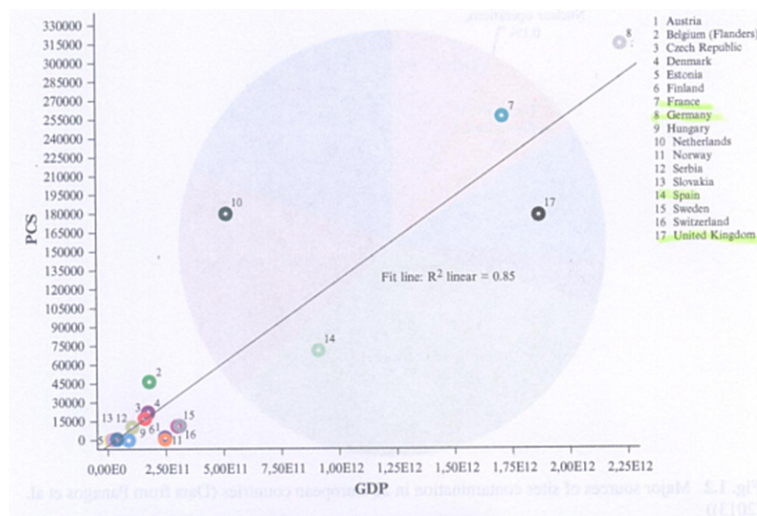
종류	오염부지
석유류 및 유독물 제조·저장시설	>1,280개소
휴폐금속+석면광산	>1,000개소
석탄광산	>200 개소
산업단지	전국 산업단지내 산업지역에서 3,200지점, 총면적의 약0.04%, 약 225,450m <sup>2</sup>
폐기물매립지	220개소
철도시설부지	50개소
한국군기지	약300~600개소
미군기지	>80개소
계	>6,330개소 ~ >6,630개소

자료: 박용하 외(2003)

○ 국내 토양오염 관련된 환경 여건과 외국의 오염부지 추정사례를 볼 때, 국내 오염부지 추정치보다 훨씬 클 것으로 추정된다.

- Dupius and Knoepfel(2015)은 유럽연합의 17개국과 국가의 GDP 수준과 상당히 밀접하게 연계되어 있음을 제시한 바 있으며(그림 3-13 참조), 이에 의하면 우리나라의 GDP와 비슷하거나 낮은 스페인과 네덜란드의 오염부지 개소 수준과 유사하다고 가정할 경우, 우리나라에서 잠재적인 오염부지 개소는 6만~16만 개소에 이를 수 있다 (이 잠재오염부지 수치는 유럽국가들이 사용하고 있는 잠재오염부지의 정의에 의한 것임).

- 2016년 GDP(국민총생산): 독일(3,467,780백만\$), 영국(2,760,960백만\$), 프랑스(2,467,790백만\$), 스페인(1,242,360백만\$), 한국(1,321,220백만\$), 네덜란드(762,521백만\$)



자료: Dupius and Knoepfel(2015) 인용

<그림 3-13> 유럽 17개국의 국가 GDP(국민총생산)와 잠재오염부지(PCS)의 관계

## ■ 토양침식

- 토양의 침식은 일반적으로 발생하는 자연적인 과정으로 침식은 토양 표면(표토)의 미세한 입자와 유기물질을 제거하고, 점차 심토의 토양입자까지 물과 함께 유실된다.
  - 토양침식의 자연적 요인은 물과 바람으로 수백~수천 km 이상의 거리까지 토양입자를 옮길 수 있으며 토양의 생물다양성은 침식과정을 변화시킨다.
  - 특히 토양의 생태계 엔지니어들은 토양의 표면을 응고시키거나 표토의 미세토양입자들을 심토로 이동시킴으로써 토양의 침식 정도를 변화시킨다 (Blanchart et al., 2004; Cerda & Jurgensen, 2008; Nooren et al., 1995; Pimentel et al., 1995).

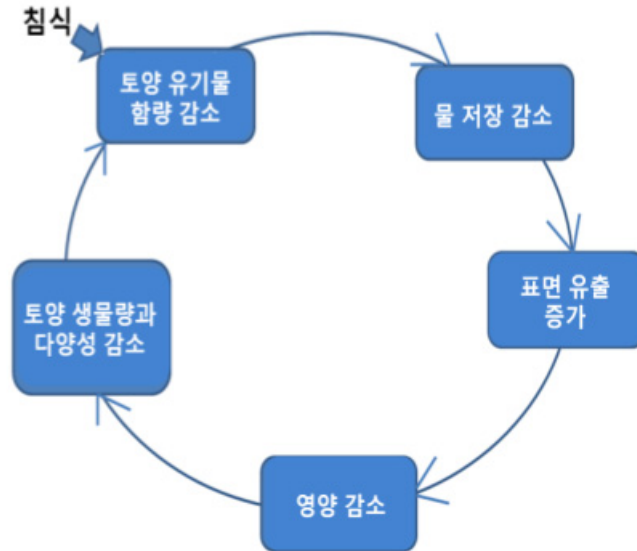


자료: EC(2010); 박&최(2012) 재인용

<그림 3-14> 토양침식과 생물량, 생물다양성의 관계

- 기후변화(장기간의 한발과 폭우 등)는 토양의 성질에 영향을 미치며 토양침식을 가속화시킨다.
  - 매년 750억 톤의 토양이 바람과 물에 의해 유실되며, 대부분의 토양유실은 농경지에서 발생하고(Myers, 1993), 침식된 토양은 호수와 강 등에 침전되며 자연 서식처를 훼손시킨다.
- 토양침식은 식물의 성장과 다양성, 생물량 등에 영향을 미침으로써 간접적으로 토양의 서비스 기능에 영향을 나타낸다.
  - 침식은 식물 성장을 감소시키게 함으로써 토양의 탄소저장을 감소시킨다.
    - 침식은 토양 구조와 토양의 탄소를 대기 중에 노출시킴으로써 토양에 저장된 탄소를 대기 중으로 방출을 유도한다.
  - 토양의 손실(1t/ha/yr)은 향후 50-100년 기간 중 표토층의 자연적인 형성이 재생 불가능하게 된다 (Jones et al., 2003).

- 자연적인 형성이 재생 불가능한 표토 층은 농경, 산림, 목초 및 건설 행위 등에 부적합하게 된다.



자료: EC(2010); 박&최(2012) 재인용

<그림 3-15> 토양침식의 직접 또는 간접적인 영향과 요소 간의 상호 관계

- 토양침식은 유럽 토양의 46.3%에 영향을 미치고 있으며, 이러한 토양유실은 산림의 황폐화, 농경지의 질 저하로 연결된다.
  - 호주의 비건조 지대에서 농업과 방목이 이루어지고 있는 토지의 43%의 토지가 침식의 영향을 받고 있으며,
  - 미국에서 경작지의 27%(48백만 ha)가 잠재적 고침식 위험지로 구분되고 있다.
- 우리나라의 연간 토양침식량은 32톤/ha/yr로 OECD 국가 중 8번째이며, 논에서는 1.8톤/ha/yr, 밭에서 32.1톤/ha/yr, 산림에서 3.37톤/ha/yr로 평가되며(OECD, 2008; 김주훈 등, 2011), 우리나라 논과 임목지 산림은 OECD의 토양 침식 등급 허용 한계(tolerable)에 해당하며, 밭은 약간 심함(High) 등급에, 그리고 무임목지 산림은 매우 심함에 해당한다 (정영상, 2015).

<표 3-4> 우리나라 농경지의 토양 침식 등급별 분포

구분	토양 침식 등급							가중 평균 (톤/ha /yr)
	매우 적음	적음	약간 적음	보통	약간 심함	심함	매우 심함	
토양유실량 (톤/ha/yr)	0~2	2~6	6~11	11~22	22~33	33~50	50<	
논 <sup>1)</sup> 면적(천ha)	872	234	21					1.8
비율(%)	77.4	20.8	1.9					
밭 <sup>1)</sup> 면적(천ha)	36	90	99	159	82	85	168	32.1
비율(%)	5	12.5	13.8	22.1	11.4	11.8	23.4	
산림 <sup>2)</sup> 임목지 비율(%)	93.6							26.0
토양침식량 (톤/ha/yr)	1.84							
무임목지비율(%)							6.4	
토양침식량 (톤/ha/yr)							377.8	
OECD 침식 등급	허용 한계 Tolerable	낮음 Low	보통 Moderate	심함 High	매우 심함 Severe			

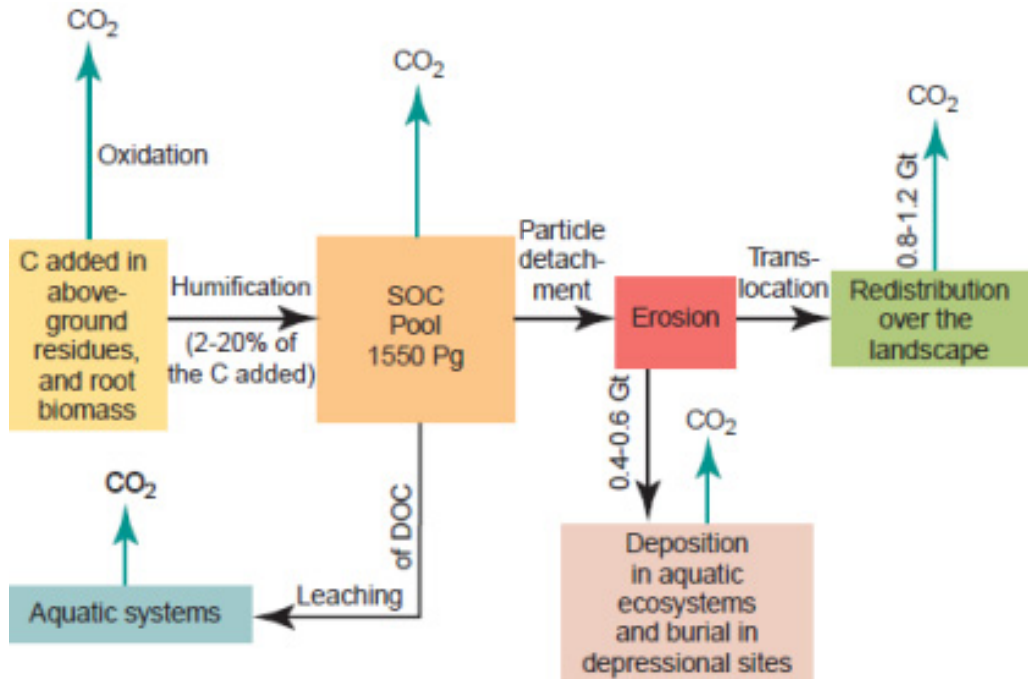
주 1) 경작지(논, 밭) : 광한강 등 (2005)의 표 5 재작성 (매우 심함의 평균 침식량 80톤으로 가정)

주 2) 산림: 김주훈 등 (2011)의 재평가

자료: 정영상 (2015)

## ■ 유기물질의 고갈

- 토양 중의 유기탄소(soil organic carbon)는 토양유기물질(soil organic materials)의 주요성분으로 식물 및 미생물 성장을 통해 토양의 생물, 물리, 생화학적 특성을 증진시킨다.
- 토지의 경사도는 유기물 축적에 영향을 미치고 있으며, 토양유기물질의 양은 인간의 행위에 따라 달리 나타나며, 토양의 이용 방법(농경지, 초지 등), 논밭을 갈아엎는 깊이에 따라 유기물질의 토양 내 분포를 변화시킨다.
  - 일반적으로 농경지 토양의 유기물함량은 일반 비옥한 토양의 유기물 함량보다 낮으며, 농경지의 과도한 관개는 농경지의 유기물 함량을 떨어뜨린다.
    - 과도한 가축 방목의 경우도 토지의 유기물 함량을 떨어뜨린다.
- 토목공사에 의해 수목이 벌채된 지역에는 수목으로부터의 유기물 공급이 없어지며, 토양의 유기물함량의 평형상태는 깨진다.
  - 토양에 남아있는 유기탄소는 모두 분해되어 CO<sub>2</sub>로 방출된다고 가정할 때, 이에 걸리는 시간은 CO<sub>2</sub>의 축적량과 분해속도에 의해 결정된다.
    - 표층 30cm의 축적량 90톤CO<sub>2</sub>/ha 및 CO<sub>2</sub>의 방출량 95톤CO<sub>2</sub>/ha/년을 이용하면, 대기 CO<sub>2</sub>가 방출되는 시간은 약 3.5년이다 (삼림종합연구소, 2001).



자료: Lal (2004).

주: 위로 향하는 화살은 CO<sub>2</sub>의 대기 방출이며, 혐기성 상태에서는 CH<sub>4</sub>가 방출. 배수가 잘 되는 토양에서는 CH<sub>4</sub>와 유기탄소가 토양에 비축됨

<그림 3-16> 토양 유기탄소(SOC, Soil organic carbon)의 흐름

### ■ 토양의 산성화염화

- 토양의 염화(salinisation)란 물에 용해되는 염분이 토양에 축적되어 나타나고 있으며, 토양 미생물의 생태에 매우 중요한 요인으로 염기 농도가 높을 경우, 식물과 다른 토양생물의 기능에 치명적인 영향을 나타내며, 대부분 토양세균의 경우에는 더욱 치명적이다.
  - 토양 염류의 농도가 변하게 되면, 대부분 세균은 휴면상태(dormancy)로 변하거나 사멸된다.
    - 토양의 조절자와 생태계 · 화학적 엔지니어의 경우, 토양의 염화에 민감함. 토양의 염화가 진행되면 식물생장과 작물의 생산성은 급격하게 감소한다.
    - 토양의 염화는 생물다양성을 감소시키고 더불어 이 지역의 사막화를 초래한다.
    - 유럽의 경우 약 1백만 ~ 3백만 ha의 부지의 토양이 염류 피해를 받고 있다.
- 우리나라 제주도 등 섬의 해안지역에서는 바닷물이 지하로 침투되어 토양의 염화현상이 발생된바 있다 (오윤근 등, 2000; 김지영 등, 2001; 김경호 등, 2009).
  - 최근에는 기후변화에 의한 해양지역에서 발생한 태풍 등으로 인해 바닷물이 해안육지로 올라옴에 의해 인근 토양이 염화되는 경우가 발생하는 사례가 보고되고 있다 (국립기상연구소, 2009; Anisimov et al., 2007).

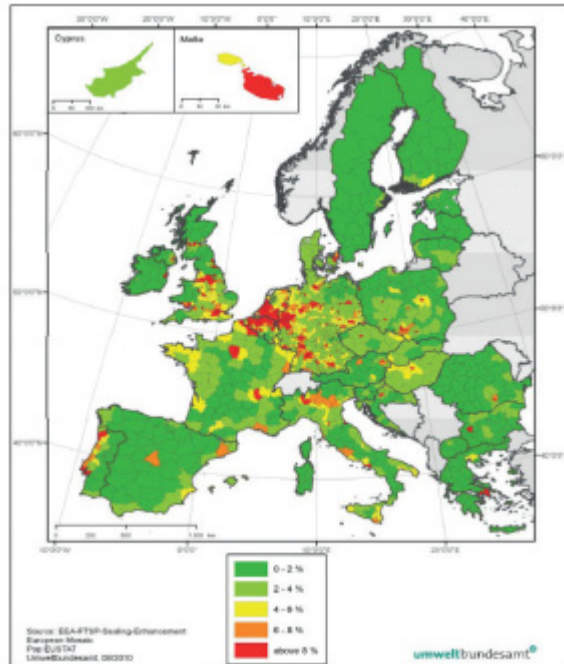
## ■ 토양의 다짐

- 토양의 다짐은 토양의 입자 간에 비어져 있는 기공의 면적(pore space)을 감소시키는 물리적인 훼손으로 토양의 미세 또는 큰 입자들의 조직이 재배치되어 토양의 주요 기능이 떨어지게 한다.
  - 토양의 다짐은 토양의 밀도를 올림으로써 토양의 공극율 감소, 물의 침투력 감소 및 저장능력 감소, 토양의 구조 훼손, 토양의 생물학적 감소)으로써 물리적 특성을 훼손하는 등 물의 배수와 흐름을 변화시킨다.
  - 토양의 다짐 정도는 토양의 구조, 수분함량, 유기물질 함량 등과 토지의 이용과 기후변화 등에 따라 결정된다.
- 토양의 다짐은 토양의 생물다양성을 변화시키며, 기후변화를 촉진시키고, 심한 토양의 다짐이 발생한 부지의 생물다양성은 자연적으로 회복하기 어렵다 (Ruser et al., 2006).
  - 토양 생태계 엔지니어의 접근성이 달라지면, 토양 내 물과 공기가 존재하는 공극률이 달라지고, 이로 인해 식물과 미생물의 생장이 변화한다.
    - 깊이 뺏어야 할 뿌리를 갖고 있는 식물 등은 토양이 다짐된 지역에서 생존하기 어렵고, 미생물의 군집도 변화한다 (Whalley et al., 1995).
    - 토양의 다짐으로 인해 지하로 침투되지 않는 물은 표토로 흐르면서 토양의 침식을 부추긴다.
  - 토양의 다짐은 탈질화를 증가, N<sub>2</sub>O와 NH<sub>3</sub>의 방출 증가, 메탄(CH<sub>4</sub>)의 산화(흡수력) 감소, NO<sub>x</sub>의 방출 감소, 호흡 감소에 따른 CO<sub>2</sub>의 방출 증가 등을 일으키어 식물의 성장력을 감소시키고 토양의 생산력을 저하를 초래한다 (Robinson et al., 2010).
- 유럽 토양의 경우, 28%에 해당하는 부지에서는 토양다짐이 상당히 심하게 발생하고 있으며, 9%의 부지에서는 매우 심하게 발생한다 (Jones et al., 2003).
  - 특히 중부와 동부 유럽 토양에서의 다짐은 심각함이 보고되고 있다.
    - 20년 전 농기계는 약 50kN (5000kg)을 실었으나 최근에는 130kN으로 증가하였다 (사탕무 우 농장의 경우).
    - 최근 큰 타이어를 장착한 농기계 사용 증가로 인해 토양압박이 증가하는 것으로 보고되고 있다.
    - 농경 시 이용되는 중장비에 의한 토양다짐으로 인해 표토에서 1~2m 사이의 토양 다짐이 일어나며, 이로 인해 토양 생물다양성이 크게 위협받는다 (EC, 2010; Jeffrey et al., 2010).

## ■ 토양의 차폐

- 아스팔트, 콘크리트 등 불투수 재질로 표토를 차폐(sealing)하는 것은 토양 압축과 더불어 물의 흐름을 차단하고 궁극적으로는 토양의 생물다양성을 변화시키는 등 토양의 기능을 상실하게 된다.
  - 도로, 건물 등으로 인한 토양의 차폐는 대부분 콘크리트, 콜타르 등의 불투수성 도로 포장재로 인해 발생된다.
  - 이러한 불투수층 포장재로 뒤덮인 부지 토양에서는 물의 토양 내 침투가 어렵게 되며, 토양의 생물학적인 기능은 현저히 낮아지고, 이 부지에서의 대부분 미생물은 휴면상태로 들어가던지 사멸된다.
  - 이로 인해 이러한 부지에서의 동식물 생장은 어렵고, 이로 인한 표토 유출수 발생이 증가하고, 토양 내의 물의 침투는 낮아짐으로써 물을 흐름을 변화시키며 탄소의 흡수를 급격하게 떨어뜨린다 (EC, 2012).
    - 식량생산 감소를 일으키고,
    - 토양내의 물의 흡수 감소는 지표면 유출수 증가 및 지하수 감소로 이어지며,
    - 대기중의 이산화탄소 흡수 감소는 기후변화를 가속화시키고,
    - 육상생태계의 생물·화학적 순환고리를 단절하여 대기의 오염물질 필터링 능력 감소시키며,
    - 도시의 태양 복사열 증가로 도시의 열섬 효과 증가 및 기후변화를 가속화시킨다.
- 유럽에서 도로 및 건물 등에 의한 토양의 차폐 정도는 지역에 따라 크게 다르나 도시 지역에서의 토양 포장율은 대단히 높으며, 도시화의 진행으로 차폐된 부지면적이 증가되고 있다.
  - 포르투갈 도시지역의 49%, 독일 도시지역의 47%(독일 면적의 5%에 해당), 네덜란드, 스페인, 헝가리 도시지역의 45%에서 부지의 토양이 차폐되어 있으며 (IASS, 2015; EC, 2011), 평균 27ha/일의 부지가 도시의 팽창으로 인해 차폐되고 있다 (Federal Office of Statistics, 2013).
    - 토양의 차폐율은 스웨덴, 루마니아, 핀란드, 에스토니아 도시면적의 20~26% 정도로 포르투갈과 독일 등 도시지역의 토양차폐율보다 상당히 낮다 (IASS, 2015).
    - 전체 면적에서 차폐된 토양의 면적은 국가별로 차이가 있으나, 국토의 평균 2.3%에서 토양이 차폐된 것으로 보고된다 (IASS, 2015).

- 프랑스의 경우 1990~2000년 기간 중 도시화에 따른 토양의 차폐는 약 4.8% 증가(IFEN, 2005)하고 있으며, 대부분 유럽연합 국가에서 토양의 차폐율은 도시의 팽창과 더불어 토양의 차폐가 지속적으로 증가하였다 (EC, 2013).



자료: IASS(2013), EC(2011)에서 재인용

<그림 3-17> 유럽연합 27개국의 토양차폐율(%)

- 우리나라에서 토양의 차폐에 의한 전국의 불투수 면적 비율은 1970년 3%에서 2012년 7.9%로 2배 이상 증가하였다 (환경부, 2013).
- 토양의 차폐에 의한 불투수 면적 증가는 자연의 물순환 구조를 왜곡시켜 하천구조물이 소통해야 할 최대 홍수량을 증가시키고, 강우시 유출되는 빗물이 하천에 도달하는 시간을 단축시켜 하천변 저지대 침수 원인이 되고 있다.
  - 전국토의 7.9%는 수계와 임야를 제외하면 이는 전 국토의 22.4%에 달하는 면적이다.
- 또한 지하 침투량을 감소시켜 지하수 고갈과 하천 건천화를 야기시킨다.
- 도시의 미기후 조절 능력을 감소시켜 열섬 현상을 악화시키는 등 도시민의 생활환경에도 직접적으로 영향을 미치는 요소로 작용한다.

## ② 지하수

### ■ 지하수 오염

- 지하수환경에 악영향을 주는 잠재오염원은 점오염원(point sources)와 비점오염원(non-point 또는 diffuse sources)로 나눌 수 있다 (한정상과 한찬, 2015).
  - 대표적인 점오염원은 정화조(septic tank system), 지하저장탱크(underground storage tanks, UST), 유해 폐기물 처분장(hazardous waste sites), 매립지(landfills), 지표저류시설(surface impoundments) 및 폐정(abandoned wells) 등을 들 수 있다.
  - 비점오염원으로는 비료, 농약 살포와 같은 농경지와 산성비, 가축매몰지 등이 있다.
    - 가축매몰지는 2군의 ‘죽은가축의 매장지’로 분류된다.
    - 최근 가축매몰지 주변의 지하수 오염이 다수 보고되고 있는데, 이는 침출수로 인한 것인지, 다른 오염원에 의한 것인지 명확하지 않은 한계점이 있고. 꾸준히 조성되고 있는 가축매몰지 침출수 유출로 인한 지하수오염의 역학관계를 밝혀내는 데 더 많은 연구가 필요로 하고 있다.

<표 3-5> 지하수환경의 오염을 유발하는 잠재오염원(6군 35종)

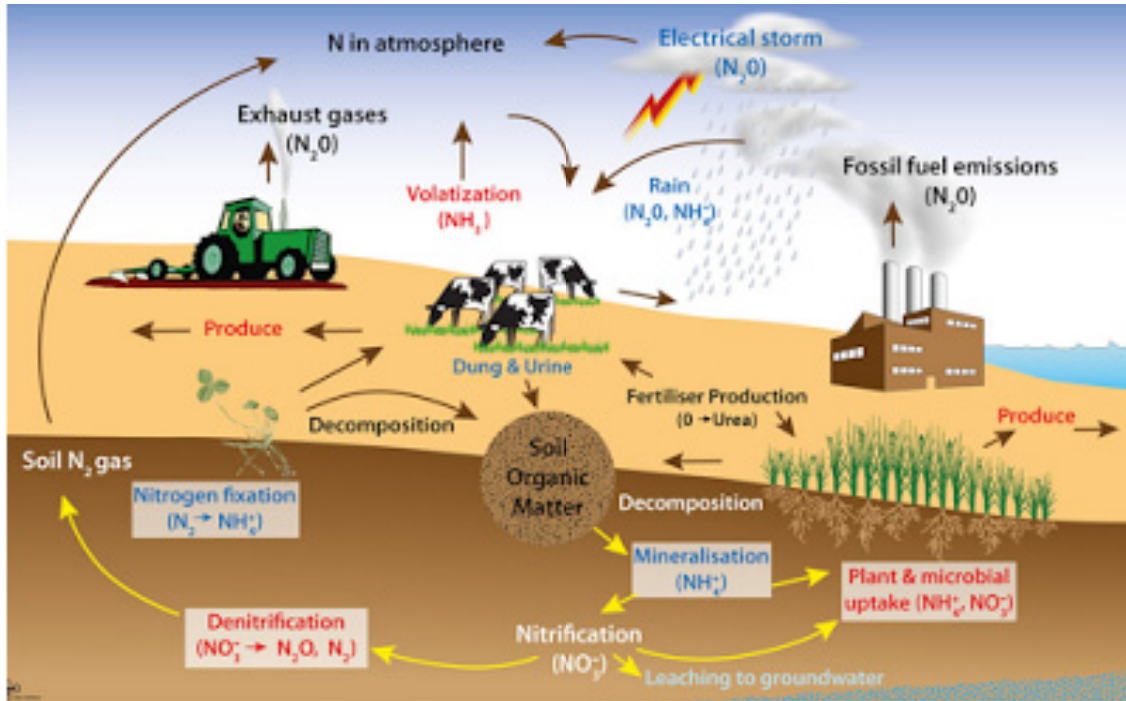
구분	종류
1군 배출, 방유목적으로 설계된 오염물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하침투: 정화조, 오수조, 지하침투식 침하조, 분뇨처리수의 침하조</li> <li>- 주입정: 유해폐기물, 고농도염수의 처분, 축산폐수, 하수, 인공함양</li> <li>- 지상살포: 관개용수의 재살포, 슬러지와 축산폐수의 농업용 지상살포, 유해 및 비유해폐기물</li> </ul>
2군 저장, 처리, 처분시설로부터 누출된 오염물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 폐기물 매립지(산업유해 및 비유해폐기물, 도시쓰레기 매립지)</li> <li>- 폐기물의 불법투기</li> <li>- 주거지에서 쓰레기 무단 투기</li> <li>- 지표저류시설(유해 및 비유해폐기물)</li> <li>- 광산폐석(waste tailing)과 광미</li> <li>- 폐기물 야적장(waste pile) 및 하치장</li> <li>- 비폐기물의 비축지(non-waste stock piles)</li> <li>- 공동묘지</li> <li>- 죽은가축의 매장지</li> <li>- 지상저장탱크(유류, 독성화학물질)</li> <li>- 지하저장탱크(유류, 독성화학물질)</li> <li>- 컨테이너(유류, 독성화학물질)</li> <li>- 소각장과 발파지</li> <li>- 방사능 폐기물 처분장</li> </ul>
3군 운송 배관시설로부터 누출된 오염물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 배관(유해폐기물, 비유해폐기물, 송유관, 하수관)에서 누출, 재래식 하수관</li> <li>- 운송과정에서 누출 및 유출</li> </ul>
4군 기타 활동으로 배출 및 살포된 오염물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 관개용수의 재순환</li> <li>- 농약살포</li> <li>- 비료살포(농경지에 사용한 유기 및 화학비료)</li> <li>- 가축사육장의 가축분뇨 및 폐수</li> <li>- 제설, 제빙제 살포</li> <li>- 도시지역의 강수 유출</li> <li>- 광산개발에 따른 광산폐수</li> <li>- 대기오염물질의 지하침투</li> <li>- 폐수 및 오수에 의해 오염된 지표수</li> </ul>
5군 지하수 흐름 경로 변경에 따른 오염물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 채수정(유정, 가스정, 온천, 열교환용 우물, 부적절하게 설치된 우물)</li> <li>- 기타 우물(관측정, 탐사시추공 및 공사용 대구경 착정공)</li> <li>- 공사용 지하굴착</li> </ul>
6군 인간활동에 의해 자연적으로 발생된 오염물질	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지표수와 지하수의 연관관계</li> <li>- 자연적인 침출</li> <li>- 대수층내로 염수침입과 염수의 역상승 현상(upconing)</li> <li>- 재래식 화장실</li> </ul>

자료: 한정상 & 한찬 (2015)

- 지하저장탱크(UST)의 부식으로 인해 저장된 유독성 화학물질, 유류 등이 지하로 누출되면서 발생하는 지하수 오염은 주변 인간과 생태계에 심각한 악영향을 미친다.
  - 누출된 탄화수소류가 지하로 스며들어 일부는 최상위 대수층위에 떠있고, 휘발성이 큰 성분은 휘발하여 가스상태로 비포화대와 대기로 확산되며, 그 일부는 비포화대 내에서 흡착된 가스 상태로 잔존하기도 한다.
  - 이 중 비중이 1보다 큰 탄화수소류(DNAPL)는 대수층 바닥으로 가라앉는다,
  - 또한 수용성이 큰 탄화수소는 지하수에 용해되어 지하수 흐름에 따라 주변 지하수를 먹는 물로 섭취하는 인간과 생태계에 심각한 영향을 미친다.
  - 지하저장탱크의 누출로 인한 지하수 오염문제는 국내·외에서 중점적으로 다루고 있는 문제이다.
    - 미국의 석유저장탱크 수는 1.5~2백만개에 이르며, 이중 1.2백만 개가 steel tank로 제조되었는데 그 중 부식방지용 탱크는 16,000개 정도밖에 되지 않는다.
  - 국내의 용산미군기지 주변의 지하수 유류 오염도는 정화기준의 500배가 초과한 것으로 나타났다 (뉴스포스트, 2016.12.19.).
    - 녹사평역 주변은 벤젠이 허용기준치의 587배, 캠프킴 주변은 석유계총탄화수소가 허용기준치의 512배가 검출되었다 (헤럴드경제, 2016.12.19.).
    - 용산미군기지 주변 유류오염 지하수는 녹사평역과 캠프킴 주변에서 지속 발행하고 있어, 녹사평역은 2001년 이후 16년간, 캠프킴은 2006년 이후 10년간 서울시에서 정화작업을 지속해오면서 녹사평 주변 오염도는 2004년 최고농도 대비 70% 감소했고, 캠프킴은 92% 감소했으나 여전히 지하수법에서 정한 허용기준을 초과하고 있다 (헤럴드경제, 2016.12.19.).
- 유해폐기물 처분장(hazardous waste sites)에서 지하수계로 누출된 독성 및 유해물질과 폐기물의 부적절한 처분방식과 취급으로 그 하부 지하수 환경과 지표수 환경의 오염을 유발한다 (국가지하수정보센터, 2017).
  - 독성 및 발암성 유기화학 및 중금속류 25개 물질이 미국의 546개의 NPL site에서 지하로 누출되어 검출되었다 (Hazardous waste consultant, 1965: 한정상과 한찬, 2015에서 재인용).
- 일반폐기물매립장이나 최근 대두되고 있는 가축매몰지 등에서 강우의 지하침투나 부적절한 관리로 인해 침출수가 생성되고, 인근 지하수환경을 오염시킨다.
- 지표저류시설에서 다양한 산업체 폐수를 저장, 처분, 처리하는 과정에서 시설의 차수막 설치 여부, 관리 등에 따라 하부 지하수계에 큰 오염원으로 작용한다 (한정상과 한찬, 2015).

- 미국의 경우 전체 SI 중에서 70%가 차수막을 설치하지 않은 형태이고, 30%는 최상위대수층 직상방에 설치되어 있다.
- SI를 통해 지하수 환경에 미치는 주 가능오염원은 암모니아, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, 인, 박테리아 및 바이러스 등이며, 그 외 중금속, 산, 석유부산물, phenol 등을 들 수 있다.
- 정화조에서 일부 정화된 방류수는 지하로 침투토록 설계되어 있는데, 이런 방류수 유출은 지하수의 수질의 변화를 야기하는데 특히 질소, 인, 박테리아 등의 물질에서 음용수의 수질기준 초과를 유발한다 (한정상과 한찬, 2015).
- 저류조 내의 고형성분이 침전되고 남은 액체성분(부유물질, 암모니아성 질소, 총 인산염, 박테리아, 바이러스 등)은 토양 속에 침투하여 잠재적인 지하수 오염원으로 작용한다.
- 미국은 가정용 정화조에 의한 지하수 오염이 주요 이슈에 해당하며, 특히 박테리아로 인한 가정용 우물의 먹는물 이용 등에 대한 문제를 인식하였으나, 법적 조치가 수행되지 못하고 권고수준으로 관리가 이루어지고 있다.
- 부적절하게 시공된 우물이나 공사용 착정 시추공 등의 시설이나 행위는 오염물질이 지하로 유입될 수 있는 경로를 제공한다 (한정상과 한찬, 2015).
- (질산성 질소, 잔류농약 오염) 비점오염원 중에 농약과 비료에 의한 질산염(특히 질산성 질소)와 잔류농약 성분은 국내뿐 아니라 OECD 주요 국가에서 중점적으로 다루고 있는 지하수 환경의 대표적인 오염이다.
- 국내의 지하수내 질산염 농도는 기준초과를 기록한 공간적 분포뿐 아니라, 심도별 분포에서도 지속적인 증가 추세이다.
  - 국내 전국 지하수수질측정망 자료 분석을 통한 지하수 내 심도별 질산성 질소 오염 현황을 보면, 먹는물 수질기준을 초과한 지점이 다수 존재하며, 대심도(80m)까지 오염이 확산된 사례도 다수 발생하고 있다 (이수재 외, 2015).
- 국내의 농경지역의 대부분은 하천주변의 충적층에 밀집되어 있는데, 하천 인근에 주로 분포하는 농경지나 축산단지에서 우기에 지표유출이 발생하거나, 오염된 지하수가 기저유출의 형태로 하천으로 유입되는 경우, 하천 내의 질소, 인 등의 영양염류의 증가를 가져온다 (그림 3-18 참조). 또한 지표수-지하수 상호작용 구간에서의 지하수 환경 내 수질 변화를 야기한다.
- 농촌지역의 대부분 먹는물공동시설, 소규모급수시설 중 마을상수도 등에서 질산성질소로 인한 먹는물 수질기준 초과 등으로 물이용의 제한이 발생하면서 물안보에도 영향을 미친다.

- 지하수환경은 일반적으로 혐기성상태이므로, 발암성 및 독성 유기화합물은 자연적인 생분해작용에 의해 잘 분해되지 않고, 장기간 지하수계 내에 잔존해 있다 (한정상과 한찬, 2015).



자료: ClassNotes.org.in(2016)  
 (<http://classnotes.org.in/class-9/natural-resources/nitrogen-cycle-2/>)

<그림 3-18> 질소의 순환관계

- (자연 방사성 물질 오염) 라돈은 자연유래의 방사성 물질이나 공기를 통한 접촉이나 섭취 시 암 발생 증가 등을 유발하면서, 국내외에서 중점적으로 다루고 있는 사안이다.
- 상수도 미보급 지역에서 지하수를 이용한 직접 음용으로 인해 자연방사성물질의 지속적인 노출이 발생한다.

## ■ 지하수 고갈

- 전 세계적으로 지하수위 저하 즉 지하수 고갈(groundwater depletion)은 지하수 환경의 다양한 (대체로 부정적인) 물리적·화학적 변화를 야기시킨다.
- 지반침하(land subsidence): 지하수위 저하 시 간극수압의 감소로 유효응력이 증가하고, 간극수압의 소실은 흡입자에 보유하고 있던 토양수분이 감소하면서 토양의 압밀 현상에 의해 지반면이 내려가는 압밀침하 등을 유발함. 이러한 토양수분의 변화는 지하수위의 변화와

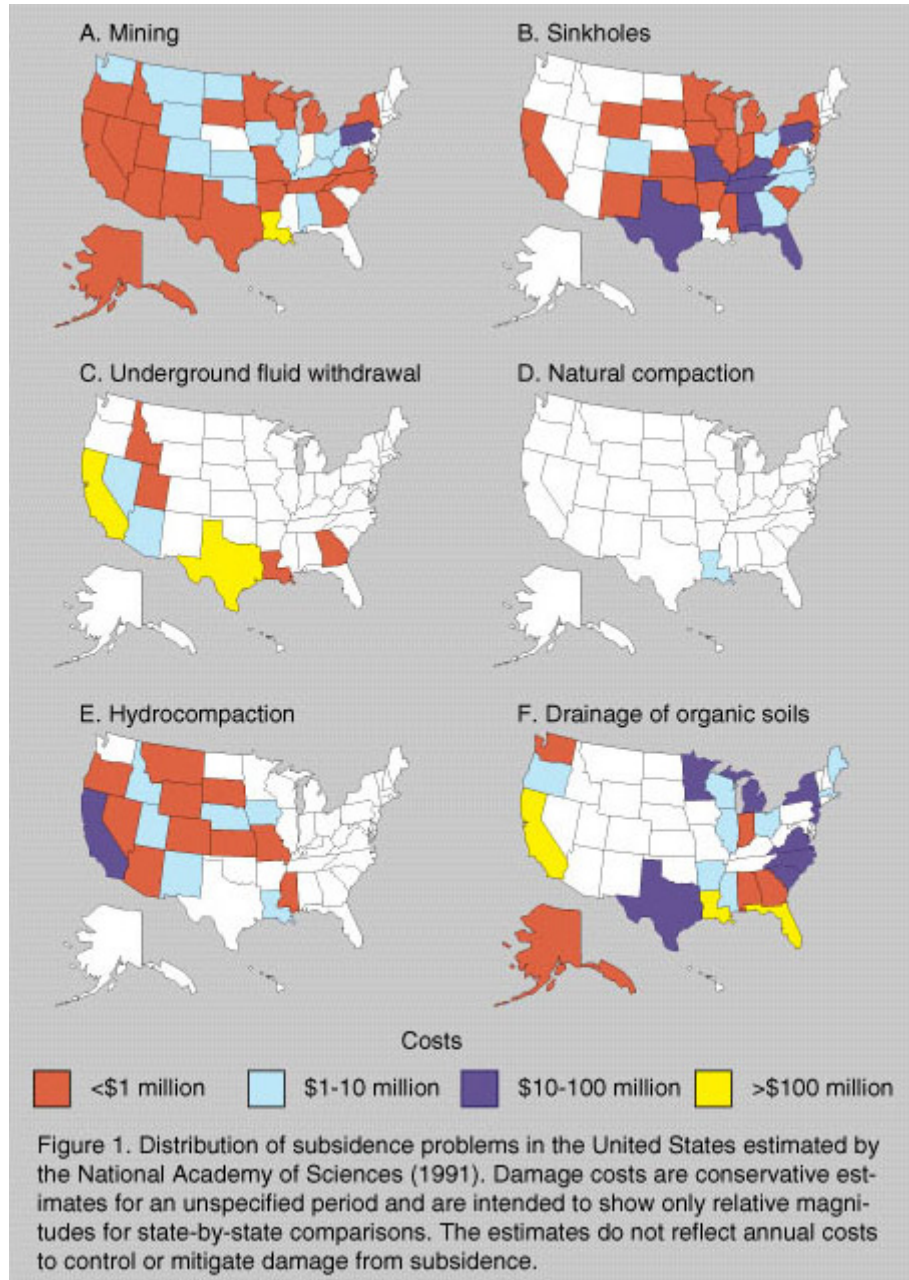
밀접한 관련이 있다.

- 해수 침입(seawater intrusion): 해수(염수)가 해안지역 담수 대수층으로 침투되는 현상이며, 지하수 양수 등으로 수위가 낮아지거나 지하수 유출량이 감소하면 해수를 밀어내는 힘의 저하로 인해 내륙 쪽으로 해수의 침투가 촉진된다.
- 하천유량 감소로 인한 하천생태계 및 생태계서비스가 저하된다.
  - 모세관대(capillary zone)는 지하수면 바로 위에 위치하여, 토양의 공극에 물이 채워져 있는 영역으로, 식물의 지속적이고 안전하게 수분을 공급하는 주요 공급원이다. 그러나 지하수위의 저하는 모세관 영역의 토양 입자간 공극에 채워지거나 입자에 결합하고 있는 수분의 변화를 초래하여 상위 생태계의 수분 공급에 영향을 준다.
  - 주변 하천수위와의 관계에 따라 다르게 작용되나, 지하수위 감소는 하천으로 유출되는 지하수량의 저하로 주변 하천유량의 감소와 함께 하천생태계의 일정 유량 제공에 영향을 미친다.
- 적절한 지하수위의 유지는 토양 및 대수층의 양적·질적 변화를 초래하지 않아 계절적 변화에도 안정적인 생태계 형성과 기능을 유지하게 한다.

## ■ 지반침하

- 지반침하는 석회암지대와 같은 지질학적 요인으로 인해 발생하는 싱크홀 외에도, 도심지 등에서 지하개발이나 지하수 과잉 사용으로 인해 발생한다.
  - 지반침하는 석회암 공동에 의한 자연적 요인 외에 탄광 채굴시, 매설관(상수도, 하수도, 전기, 가스, 통신, 송전, 난방 등)의 누수, 터널공사, 굴착 등에 의해 발생한다 (윤태국, 2016).
  - 서울시의 도로함몰 자료에 따르면, 도로함몰의 발생원인인 하수관 손상, 상수관 손상, 인접 굴착공사 순으로 2010년-2014년의 발생건수 비율을 비교하면 하수관 손상이 약 84.5%, 인접굴착공사 등이 13.8%, 상수도관 손상이 1.7%에 해당한다고 보고하고 있다 (윤태국, 2016).
  - 미국 남서부의 지반침하는 대부분이 지하수 양수에 의해 발생한다 (Leake, 2016).
    - 미국의 주요 지반침하의 유형으로는 지하 광산의 붕괴, 석회암 대수층에서의 싱크홀 발생, 지하수 양수에 의한 발생, 건조 토양에 빗물이나 생활용수가 침투하여 수축하면서 지면이 부동침하하거나 균열이 발생하는 수압축(hydrocompaction)<sup>5)</sup>에 의한 침하 발생, 유기토양의 배수에 의해 발생한다 (그림 3-19 참조).

5) 지반침하 현상 중에서도 특수한 것으로 미국 서부의 캘리포니아주 San Joaquin valley의 서편에서 알려졌다. 이 부근의 충적세 산상지를 구성하는 물질들이 건조하고 저밀도의 이류 퇴적물에 해당하는데, 이러한 토양에 빗물이나 생활용수 등이 침투하면서 수축이 발생함

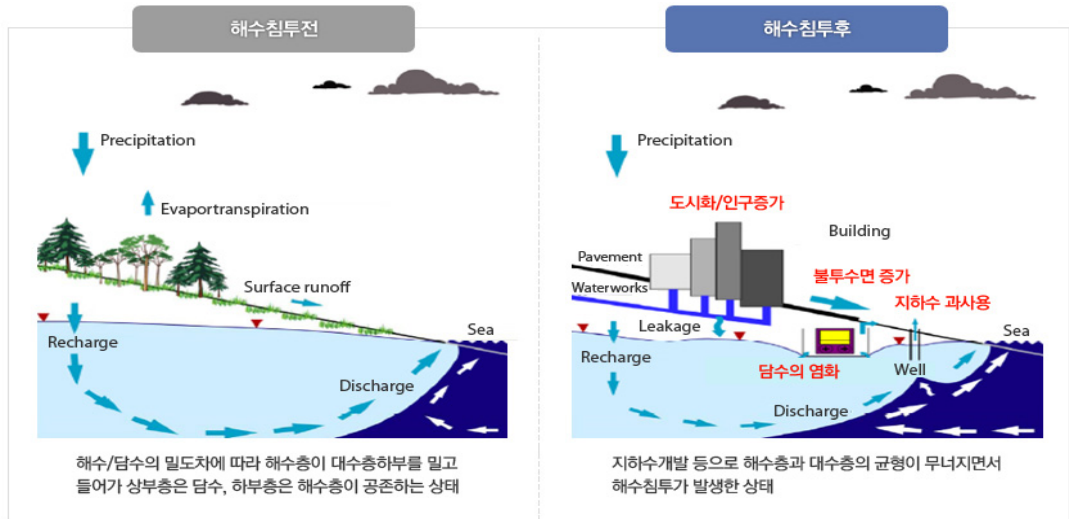


자료: Leake (2016)

<그림 3-19> 미국의 지반침하로 인해 추정되는 피해비용

■ 해수침입으로 인한 지하수 수질 저하

- 해수침입은 자연과정 또는 인간활동에 의해 담수 대수층으로 해수(염수)가 유입되는 것으로, 지하수 수위 감소 및 해수 수위 증가에 의해 발생하며, 지하수의 염수화로 인해 지하수환경의 화학적 변화를 야기시킨다 (그림 3-20 참조).

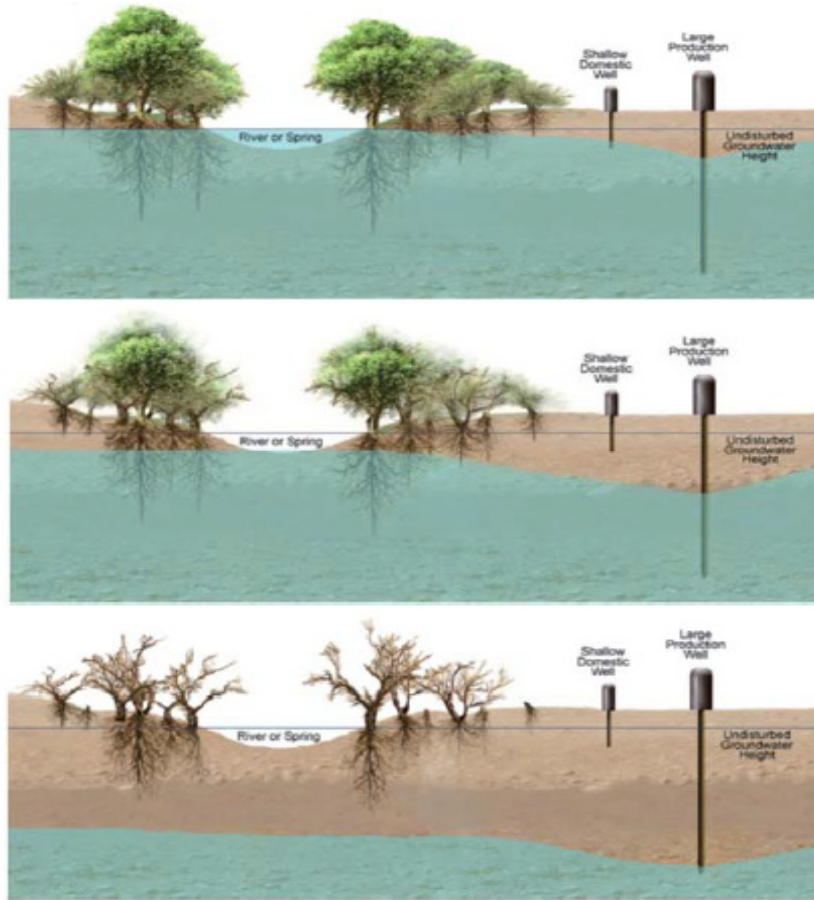


자료: (주)하이드로넷(2017.2.21.)

<그림 3-20> 지하수 과잉 양수로 인한 지하수위 변화와 해수침투

### ■ 하천 건천화 및 지하수 의존 생태계 변화

- 지하수 과잉취수로 인해 지하수위 감소는 인접한 하천의 건천화를 야기하고 지하수를 직접적으로 이용하는 지하수 의존 생태계의 식생의 변화를 야기시킨다 (그림 3-21 참조).



자료: Fonseca(2008); 강형식 외(2015)에서 재인용

<그림 3-21> 지하수위 감소에 따른 하천건천화 및 생태계 훼손

## 나. 우리나라와 주요 OECD국가의 토양지하수환경 정책과 기술

### (1) 우리나라

#### (가) 토양지하수 환경보전정책의 흐름 및 평가

##### ① 토양

##### ■ 토양환경정책의 태동 및 토양보전정책으로의 개념 전환

○ 1970년대 경제개발 정책이 중화학공업 육성에 초점을 두면서 토양오염 문제가 대두되기 시작하면서, 토양을 관리하기 위한 중앙정부 차원의 토양환경관리정책이 시작되었다.

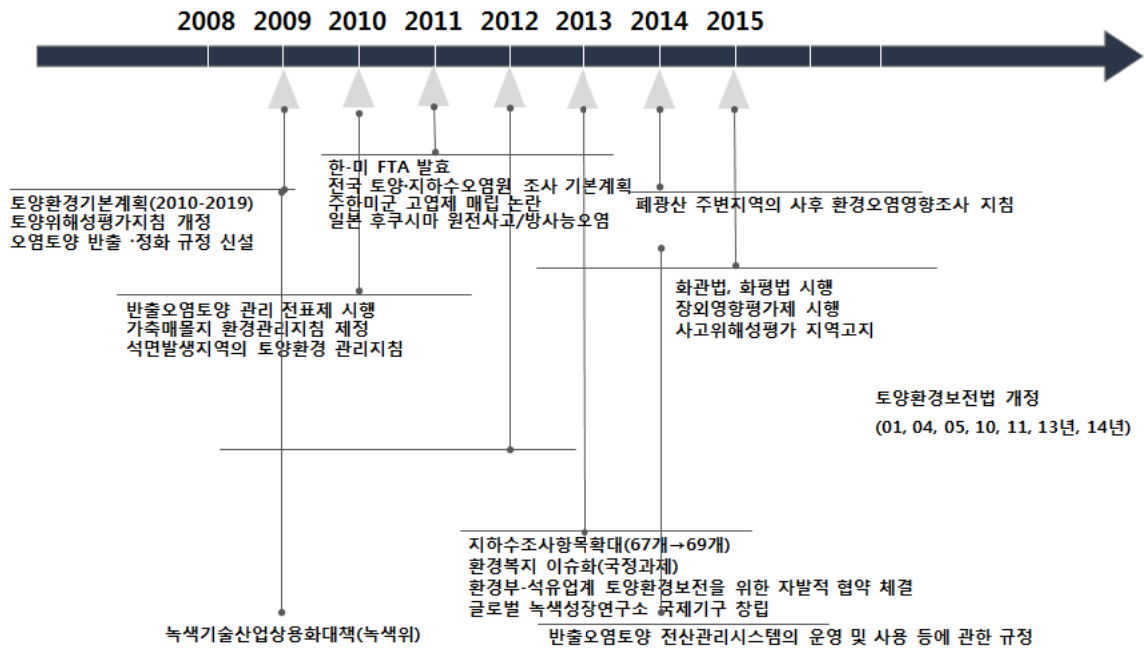
- 1980년 1.5 보건사회부 외청인 ‘환경청’의 수질보전국에 토양관리과가 설립되었고,

- 1987년부터 전국을 대상으로 한 ‘토양측정망’ 이 가동되어 전국의 토양오염도를 조사하기 시작하였다.
- 국가의 경제규모가 더욱 팽창되고 거대도시 현상이 심화되고 소비오염 문제가 악화되는 등 환경오염 현상이 광범위해지면서, 1990년 환경정책기본법의 제정과 더불어 환경보전법을 대기, 수질, 폐기물, 자연환경 등으로 분법화하고 환경청을 환경처로 격상하였다.
- 1993년 10월 토양환경 정책 개념과 방향을 ‘토양의 관리’ 에서 ‘토양의 보전’ 으로 전환시키고, ‘토양관리과’ 에서 ‘토양보전과’ 로 개편하였다.
  - 1990년대 초반 토양보전과의 주요 추진 사업은 ‘토양측정망’ 의 운영, 휴·폐광된 금속광산 지역의 정밀조사 및 토양오염방지사업 지원, 석유류 및 유독물의 제조·저장시설 관리 등이다.

#### ■ 토양환경보전법의 제정 및 발전을 통한 토양오염의 예방 및 오염토양의 개선 사업 시행

- 토양오염의 예방 및 오염토양을 정화하기 위한 사업 등이 추진될 수 있도록 정책의 기본 방향 및 수단을 내포하고 있는 ‘토양환경보전법’ 을 1995년 1월 제정하였으며, 토양오염기준과 토양오염관리대상시설 등의 기준 범위 등을 개정하였다.
- 1990년대 중반 이후 토양환경보전을 담당하는 환경부는 지식경제부, 농림수산식품부, 국방부, 소방방재청 및 지자체 등과 연계·협력하여 토양오염이 우려되거나 오염되어 있는 광산지역, 농경지, 군기지, 유류저장시설 등을 조사 및 정화하였다.
- 토양측정망의 확대 및 토양오염실태조사 시행, 광산지역, 산업단지, 군기지 등을 포함한 토양오염 취약지역의 조사 및 관리 강화, 토양오염물질을 11종에서 21종으로 확대, 토양오염기준의 3개 토지이용별 세분화, 토양오염관리대상시설 등의 오염원 관리 확대, 토양오염원 인자의 확대 및 책임강화, 토양환경평가제도의 도입(2003.1월), 위해성 평가, 토양정화업 등록, 토양정화의 검증제도 및 저장탱크에 대한 누출검사 의무화 등 선진국형 제도 도입 및 시행하였다.
  - 전국적인 토양오염실태 및 오염추세를 파악하여 토양오염예방 등 토양 보전정책 수립의 기초자료로 활용하기 위하여 환경부는 토양오염측정망, 시·도는 토양오염실태조사를 수행하였다.
  - 토양오염의 원인이 되는 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 유류, 유기용제 등 21개 물질을 규제대상 토양오염물질로 규정하고 사람의 건강 및 재산, 동·식물의 생육에 미치는 영향을 고려하여 토양오염우려기준과 토양오염대책기준으로 구분하여 설정하였다.

- 토양오염기준을 토지 이용 용도별로 청정지역 및 오염가능성이 높은 지역 등 3개 지역(1, 2, 3)으로 세분화하여 관리하였다.
  - 오염토양은 토양환경보전법에서 정한 생물학적, 물리·화학적, 열적 처리 등 정화방법에 따라 토양정화업자에게 위탁하여 정화토록 규정하였다.
  - 토양오염물질을 생산·운반·저장·취급·가공 또는 처리하는 과정에서 토양을 오염시킬 우려가 있는 시설·장치·건물·구조물 및 장소를 토양오염관리대상시설로 포괄적으로 규정하고, 토양오염의 가능성이 큰 석유류(2만리터 이상) 및 유독물 제조·저장 시설, 송유관 시설을 특정토양오염관리대상시설로 지정하여 특별관리 하였다.
  - 토양오염에 따른 피해와 오염토양의 정화책임을 명확하게 구분하기 위한 무과실 책임, 연대책임 원칙 등으로 오염원인자 범위 구체화하였다.
  - 토양오염관리대상시설이 설치되어 있거나, 설치되었던 부지의 양도·양수, 임대·임차 시 당사자간의 토양오염 책임을 명확히 할 수 있도록 토양 환경평가제도 도입·운영하였다.
- 한편 토양환경보전법에서 정한 토양오염검사를 수행하는 토양오염조사기관과 노출검사기관의 지정, 토양정화업 등록 및 정화검증 제도 등을 도입하였고, 토양오염 조사 및 정화기술 개발 사업을 지원하였다.
- 1990년대 환경부의 선도기술개발사업, 한국과학기술연구원의 환경복원 및 재생기술(Star Project) 등 비교적 단편적이고 소규모 수준에서 진행되어 온 토양오염조사 및 정화기술 개발사업을 확대하여 ‘차세대핵심환경기술개발사업’의 주요사업으로 지원하였으며, 2008년 이후 ‘토양·지하수 오염방지기술개발사업’ 추진하였다.
  - 토양·지하수 오염방지기술개발사업의 기간은 2008-2017년(10년)이며, 사전오염예방, 오염조사, 오염정화 및 사후관리기술 개발 분야에 국비 1.397억원(평균 140억원/년)을 지원하였다.



자료: 한국환경산업기술원 (2015)

<그림 3-22> 2000년 이후 우리나라의 토양·지하수 정책상 제도 추진 경위

<표 3-6> 토양보전 기본계획 5대 추진과제 및 세부내용

5대 추진과제	세부 내용
국민건강보호 및 사전예방 정책 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국민건강상의 위해성을 고려한 토양오염물질 기준 설정 및 신규 토양오염물질 (POPs, PAHs 등)에 대한 기준 확대: '09년21개→ '14년26개→ '19년30개로 확대</li> <li>- 오염토양 정화처리를 위한 이행보증제 도입 및 반출토양 정화 전과정에 대한추적관리시스템 구축</li> <li>- 공제조합 등 이행보증제 도입을 위한 제도적 기반마련(' 10년)</li> <li>- 반출토양 모니터링을 위해 단기적으로 전표제 도입 및 장기적으로 추적관리시스템 구축</li> <li>- 토양정화에 따른 사회적 비용 절감 및 합리적인 정화수준 결정을 위해 위해성 평가 적용대상 확대</li> <li>- 위해성 평가 결과에 따라 토양정화 기준을 달리 설정</li> <li>- 국내 실정에 맞는 위해성평가기법에 대한 지속적 연구 및 개발</li> </ul>
합리적 토양관리기반 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양측정망의 단계적 확대 및 토양오염물질 배경농도 지도 작성</li> <li>- 토양측정망을' 09년1,521개→ ' 13년2,000개→ ' 17년3,000개로확대</li> <li>- 측정망 등 상시모니터링 결과 등을 토대로 국가배경농도·오염지도 작성 (국민의 토지 이용 자료로 제공)</li> <li>- 국가정화우선순위제도(NPL) 도입, 정화기금 조성 및 토양환경 평가제도 활성화 등 선진 제도 도입</li> <li>- 군부대, 산업단지, AI매몰지역 등 취약지역을 NPL에 등재, 정화추진</li> <li>- 표토보전 등 기후변화에 대비한 토양환경 관리범위 확대 추진</li> <li>- 표토보전 및 유실방지체계 도입, 기후변화에 따른 토양환경변화 및 대처방안 마련, 준설토 및 폐기물 재활용부지관리 강화 등 토양지하수 측정체계 연계 등 토양지하수 연계관리 강화</li> <li>- 토양 및 지하수 측정망 연계 운영, 토양지하수정보시스템(SGIS)의 연계관리 기능 강화, 관련 제도 및 정책 개발</li> <li>- AI 등 살처분 매몰지 주변 토양 및 지하수 모니터링 및 정화 등 관리추진, 신규업무 발굴 등에 따른 토양지하수 관리조직 보강 및 개편</li> <li>- 토양지하수 관리조직을 업무별로 분리, 전문연구개발 기능 강화</li> <li>- 국가가 수행하는 정화사업 추진 등을 위한 토양오염관리단 설립</li> </ul>
토양·지하수 기술개발 및 인력육성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내 토양시장 확대, FTA체제에 따른 시장개방 등에 대비 선진국에 비해 낙후된 토양·지하수 분야 기술개발 및 실용화 중점 추진</li> <li>- 토양지하수 오염방지기술개발사업(GAIA)' 을 통해 ' 17년까지 선진국 대비 기술 수준을 90%이상 확보(현재는 49~61% 수준)</li> <li>- 핵심과제를 선정 중점 개발하고, 신속효율적으로 시장에 공급할 수 있도록 지원체계구축</li> </ul>

자료: 환경부(2009), 「토양보전기본계획(2010-2019)」

<표 3-6의 계속> 토양보전 기본계획 5대 추진과제 및 세부내용

5대 추진과제	세부 내용
녹색성장을 위한 토양환경산업 육성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양관련 신규 수요 창출을 통한 토양산업을 유망산업으로 육성</li> <li>- 국가·지자체정화사업추진, 오염우려 부지모니터링, M&amp;A 시 토양환경평가의무화를 통해 토양 시장의 양적 성장유도</li> <li>- 반출정화 대상을 지속적으로 확대하고, 「토양정화·유통단지」 조성을 통한 정화토양 재활용시장 활성화 추진</li> <li>- 토양·지하수 관련 기업의 전문성 및 경쟁력 제고를 위한 제도 정비 추진</li> <li>- 토양오염조사기관에서 토양환경평가 및 위해성평가 기관을 별도로 분리, 민간참여 확대를 통해 전문성 강화</li> <li>- 토양정화방법 및 설계 표준화, 표준단가 마련 등을 통해 토양정화</li> <li>- 산업의 신뢰성 및 투명성 제고</li> <li>- 토양·지하수 환경산업의 해외시장 진출을 위한 기반 마련</li> <li>- 단기적으로는 해외진출을 위한 단계적 전략 수립, 장기적으로는 해외진출 지원체계 구축 및 시범사업 추진 등</li> </ul>
참여형 토양보전체계 구축 및 국제협력 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산·학·연이 참여하는 토양환경센터(가칭)를 설립·운영을 통하여 토양환경관리의 기술·행정적 지원</li> <li>* 네덜란드 : 토양정화서비스센터, 일본: 토양환경센터</li> <li>- 토양환경교육 확대, 토양보전 관련 홍보프로그램 개발 등 대국민 교육, 홍보를 강화하고 황사, 산성우에 의한 토양오염 등 국가 간 토양문제에 대한 국제공조체계 강화</li> </ul>

자료: 환경부(2009), 「토양보전기본계획(2010-2019)」

### ■ 표토의 침식방지 및 보전사업을 추진

- 2000년 이후 표토의 기능과 생태계서비스를 인식하기 시작하였고, 2010년 이후 여러 중요한 기능을 가진 유한한 자원인 표토의 유실을 방지하기 위해 전국 표토의 침식조사 및 침식현황도의 작성을 추진하고 표토의 침식방지 및 표토가 유실된 지역의 표토 복원을 추진하기 시작하였다 (환경부, 2013).
  - 표토는 지질 지표면을 이루는 흙으로 유기물, 미생물이 풍부하여 식물의 양분과 수분의 공급원 역할을 수행하는 표층 토양으로 일반적으로 지표면으로부터 30cm까지를 표토로 정의된다.
- 2013년-2017년간 ‘유한한 자원인 표토(表土)의 예방적 관리를 위한 표토보전종합계획’이 마련되었다 (환경부, 2013).
  - 표토보전종합계획에서 추구하는 전략은 1) 전국 표토 침식 현황 조사 및 방지 대책 실시, 2) 표토의 가치를 고려한 보전지역 설정 및 지속적 사후관리, 3) 효율적 표토 보전을 위한 제도 개선, 기술 개발 및 산업 육성이며, 각 전략별로 중점추진과제의 이행계획을 마련하였다.

<표 3-7> 표토보전종합계획(2013년-2017년)의 전략 및 중점 추진과제

표토 침식 조사·평가체계 구축	표토 침식 방지·복원 기반 마련	표토 보전 인프라 구축
- 전국 표토침식 현황 실태조사 실시 - 표토의 복합적 가치 평가 도입 - 한국형 표토침식 조사모델 확립 - Web-GIS 기반 예측·경보 시스템 구축	- 표토침식 취약지역 침식 방지 대책 - 대규모개발 사업 시 표토유실 관리 강화 - 표토 보전지역 설정 및 복원 대책 추진	- 표토 관련 법·제도 개선 - 연구 기술 역량강화 및 유관산업 육성 - 표토보전 홍보 추진 - 표토에 관련된 대외 협력 강화

자료: 환경부 (2013)

- 표토 침식 조사 결과에 따라 표토 침식 방지 및 복원대책을 추진하고 있다.
  - 표토 침식 수준·유형 및 지역별로 최적 공법 가이드라인을 마련(2014년)하였으며, 침식량이 많을수록 식생적 기법보다는 공학적 기법을 활용하고, 가장 시급한 지역의 경우 토지 이용 변경이나 임·초지화를 추진하도록 하고 있다.
  - 탁수저감사업, 받기반정비사업 등 표토 유실 방지를 위한 유사 사업과의 연계를 추진하여 중복성을 해결하였다.
  - 기존 환경영향평가 등 제도 활용을 통해 골프장, 산업단지 등 표토의 대량 손실을 수반하는 개발사업의 인위적 침식에 따른 표토유실을 방지하였다.
  - 침식 위험 등급이 심각한 지역과 생태학적으로 중요한 비옥토, 특수 식생 서식지 등 토양의 질적 가치가 높은 지역을 대상으로 표토 보전지역 지정하고 복원대책을 추진하고 있다.

<표 3-8> 국내 표토 보전 관련 사업 추진 현황

사업명	세부 추진 사업	주관기관 (협조)
녹비작물 재배 종재대 지원 확대	- 녹비작물 재배면적 확대(145천 ha) - 우수종자 공급 등 종자대 지원 확대	농식품부
고랭지 경작지 흙탕물 저감사업 지속 실시	- 국고보조사업 등을 통한 저감시설 지속 설치 - 흙탕물 저감사업추진 개선안 마련	환경부 (지자체)
토양유실 저감형 밭기반 정비	- 포괄보조사업을 통한 밭기반정비사업 지속 추진 - 농업생산기반정비사업 계획설계기준 개정·보급	농식품부
농촌지역 맞춤형 비점오염저감시설 설치사업 확대	- 농업보호구역 등에 시설설치 가능토록 농지법 개정 - 논배수 저류시설 등 저감시설 설치 - 생태둑병, 축산습지 등 조성 확대	농식품부, 환경부
토사유출 예방을 위한 임도관리 강화	- 사면피복 등 임도 구조개량사업 추진 - 임도관리원 등 활용, 상시적 임도 유지관리체계 유지	산림청
고랭지 경작지 매수를 통한 산림복원	- 고랭지 경작지 토지 매수(162ha) - 매수토지를 활용한 산림복원 확대	산림청
농경지 토양유실 및 토양양분 유출 연구	- 기후변화에 따른 토지이용별 농업환경변화 모니터링 - 인위토양의 비점오염원 유출 특성 조사	농촌진흥청
고랭지및 경사지 밭의 비점오염관리 연구	- 작부체계 개선 및 토양유실 저감기술 개발 - 토양양분 및 유실 저감기술 개발 - 토양유실량 정밀 측정방법 개발	농촌진흥청
녹비작물을 이용한 경작지 비점오염저감 연구	- 농경지 오염원 유출억제 연구 - 화학비료 절감형 녹비작물 이용기술 개발	농촌진흥청

자료: 환경부 (2013)

## ② 지하수

### ㉠ 지하수환경정책의 시작

- 1990년에 환경정책기본법 시행령안에서 지하수환경기준이 신설(1991년 시행)되면서, 지하수 환경기준은 수도법의 음용수 기준을 원용하여 1992년까지 시행되었다 (한겨레신문, 1990.10.26.).

### ㉡ 지하수법 제정 및 발전을 통한 지하수 관리 및 정책 시행

- 1993년에 지하수의 개발·이용이라는 국민의 사적 행위의 보호 및 통제와 보전관리라는 공적행위의 두 가지 상반된 측면을 제도화하여 보호와 규제를 주된 수단으로 하는 지하수법을 제정하였다 (문현주, 2010).
  - 1993년 제정된 지하수법은 2005년까지 총 5차례의 개정을 거치면서, 주로 지하수 수자원의 수량관리, 개발 및 이용에 관련된 제도 정립에 초점이 맞춰졌다.
  - 이에 따라, 국내 지하수 정책의 기본구조 역시 지하수의 부존 특성과 개발가능량 등 파악과 그것이 오염되지 않도록 보전하고 잘 관리하여 국민이 양질의 지하수를 개발·이용할 수 있도록 하는 제 수단을 강구하는데 있다.
- 1996년 지하수의 개발·이용과 보전관리에 관한 국가 최상위 계획으로서, 지하수법 제6조에 근거하여, “지하수관리기본계획”을 수립하였고, 이에 따라 각 지자체는 행정구역 중심의 “지역지하수관리계획”을 통해, 지하수관리 기본계획의 목표 달성을 위해 지역 특성을 고려한 세부 실천계획을 수립하고 있다.
- 우리나라는 수자원정책에 있어, 현재까지 지표수 중심이었고, 지하수는 보조자원에 불과하였으나, 인구증가, 산업발전, 기후변화 등에 의해 지하수를 대체자원으로서의 인식이 증가하고 있다.



자료: 국토해양부(2012.12), 『지하수관리기본계획(2012~2021)』

자료: 국토해양부(2012)를 참조하여 연구진이 작성

<그림 3-23> 지하수법 제정 이후의 지하수관리기본계획의 흐름

<표 3-9> 지하수관리기본계획 5대 추진과제 및 세부내용

추진과제	세부 내용
개발이용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가뭄대비 지하수 지원체계 구축</li> <li>- 대용량 지하수원 개발</li> <li>- 유출 지하수 이용</li> <li>- 수변지역 지하수 이용</li> <li>- 지하수 인공함양</li> <li>- 농어촌 지하수 개발</li> </ul>
보전관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수 시설관리</li> <li>- 지하수 보전구역</li> <li>- 지하수 장애관리</li> <li>- 먹는샘물 및 온천관리</li> <li>- 제주도 지하수 관리</li> </ul>
수질관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 사전예방적 수질보전·관리</li> <li>- 수질보전을 통한 이용가치 제고</li> <li>- 오염지하수 사후관리 강화</li> <li>- 수질관련 산업육성</li> </ul>
조사·관측 및 연구개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수 기초조사</li> <li>- 지하수시설 전수조사</li> <li>- 지하수 관측</li> <li>- 지하수정보관리</li> <li>- 연구개발</li> </ul>
관리기반 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제도개선</li> <li>- 관리 인프라 강화</li> <li>- 교육 다변화</li> <li>- 홍보 강화</li> </ul>

자료: 국토해양부(2012)

- 지하수법 제정 이래로 지하수 개발이용에 관한 제도 중심이었다면, 최근에는 지하수 수질의 보전과 회복을 위한 자연자원으로서의 인식으로 전환 중이다.
- “지하수관리기본계획”의 수질관리 부문을 체계적으로 강화하기 위하여 환경부에서는 2012년부터 “지하수수질관리기본계획”을 마련, 추진하고 있다.

<표 3-10> 지하수수질관리기본계획(2012년-2021년)의 추진전략 및 중점 추진과제

추진전략	추진과제
사전예방적 수질보전·관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염원·오염물질 관리</li> <li>- 수질관리 체계 정립</li> <li>- 수질측정·검사</li> <li>- 샘플·먹는물공동시설 관리</li> <li>- 신규 지하수 영향요소 관리</li> </ul>
수질보전을 통한 이용가치 제고	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 취약지역 지하수 보급</li> <li>- 지표수-지하수 연계관리</li> <li>- 재난·재해 대비 시설관리</li> </ul>
오염지하수 사후관리 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염지하수 정밀조사</li> <li>- 오염지하수 정화사업</li> <li>- 오염지하수 사후관리체계 정립</li> </ul>
수질 관련 산업육성 및 연구개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염지하수 정화사업 활성화</li> <li>- 먹는샘물 산업 육성</li> <li>- 수질관리 관련 기술개발</li> </ul>
지하수 수질관리 기반 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 법제도 개선</li> <li>- 수질관리 인프라 강화</li> <li>- 교육</li> <li>- 홍보</li> </ul>

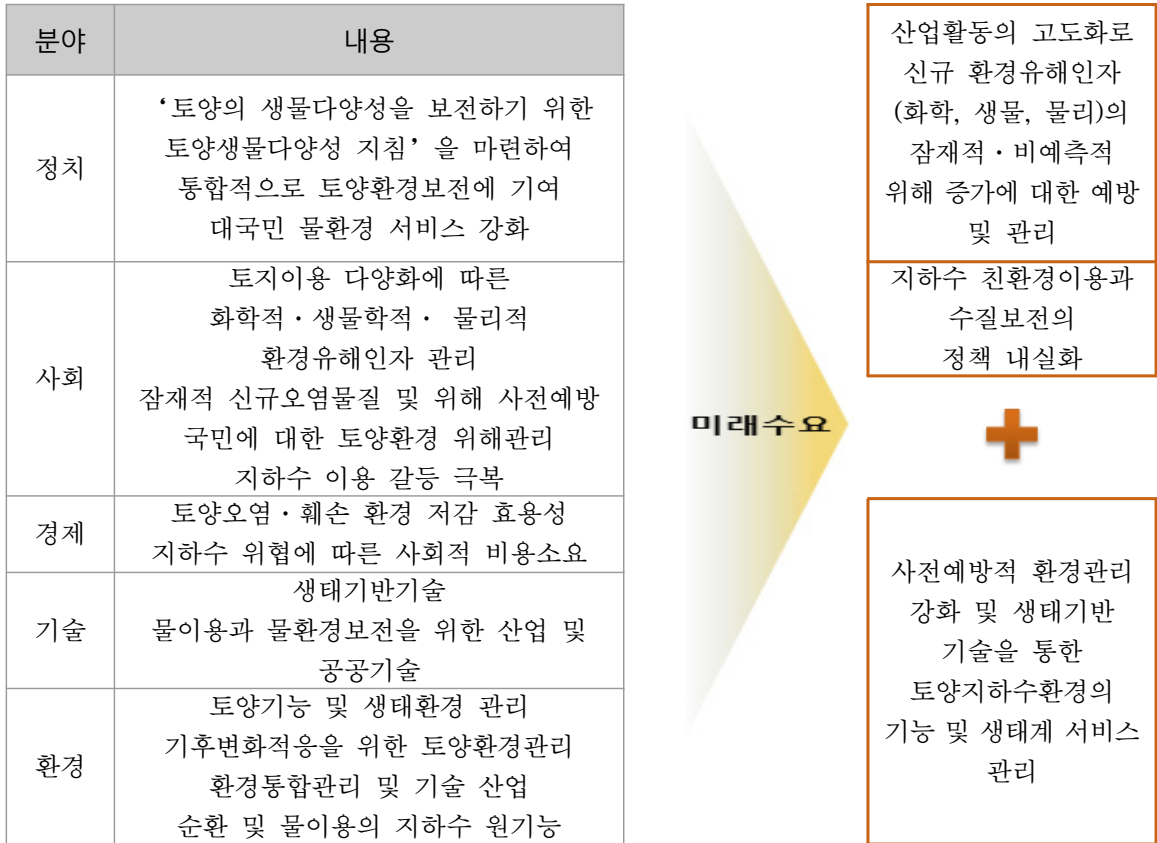
자료: 환경부(2012)

## (나) 미래환경수요 전망

### ① 국외 환경전망

- (전지구적 환경문제) 기후변화에 따른 환경영향 증가 및 신종전염병 확산 우려, 기상이변에 따른 재난·재해 속출 등 글로벌 환경위기에 대한 대응이 필요하게 되었다.
- 자원과 환경을 중심으로 세계 경제 질서가 재편되고, 기후변화 및 신규 환경 위해요인의 출현, 물 부족 등의 환경이슈가 발생될 것으로 전망된다.
- OECD 국가들에서 2030년까지 관리가 필요한 분야를 기후변화, 생물다양성, 물, 대기질, 폐기물(유해폐기물) 등으로 구분하고 있다 (OECD, 2030).

- (자원고갈 및 에너지 확보) 석탄, 석유 등 화석에너지 고갈에 따른 에너지원의 다양화 (Energy Mix) 및 지속가능한 재생에너지 생산 등 미래 에너지 확보를 위한 연구 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다 (UN, 2025).
- (물 수요 증가) 2050년에 물 수요는 55% 가량 상승할 것으로 예측되었다 (OECD, 2050).
  - 물 스트레스는 전 세계적으로 심각한 문제로 대두될 것으로 예측되며, 2050년에 23억명의 인구(전세계 40% 이상)가 물 스트레스를 경험하게 될 것으로 파악된다.
- (생물종 감소) 무분별한 개발과 환경오염 등으로 지구상 생물종은 지속적으로 감소하고 있으며( '70→' 06년까지 약 31% 감소), 매년 25,000여종이 사라지고 향후 20 ~ 30년 내에 지구 전체 생물종의 25%가 멸종할 것으로 예측되었다 (UN, 2010년).
- (글로벌 토양지하수 환경정책 메가 트렌드) 토양지하수환경보전의 관리영역을 통합적이며, 국민의 위해에 영향을 저감 및 관리하고 토양지하수의 기능과 생태계서비스를 강화하는 방향이다.
  - 글로벌 메가트렌드로 인한 토양지하수환경분야의 영향 및 주요 이슈 발굴 단계를 통한 핵심 환경 트렌드 도출한 바, 토양지하수환경의 사전예방적 환경관리 강화 및 생태기반 기술을 통한 토양지하수환경의 기능 및 생태계 서비스에 초점이 맞춰져 있다.



<그림 3-24> 토양지하수환경 5대 분야별 메가트렌드

## ② 국내 환경전망

- (환경보건) 2000년대에 접어들어 우리나라에서도 로하스(LOHAS) 개념이 확산되고, 수용체 중심의 환경보건 정책으로 전환되면서 오염취약 및 민감계층(어린이, 임산부, 어르신) 보호정책은 지속적으로 강화될 전망이다.
  - LOHAS(Lifestyle of Health and Sustainability)로서 개인의 건강과 삶의 질만 추구하는 한계점을 극복하는 것이다.
  - 일반 국민들은 환경보건 분야에서 환경성질환 특히, 아토피피부염을 정부의 시급한 대책으로 인식하고 있다 (환경부, 2008).
  - 소득수준 증가와 더불어 삶의 질에 대한 기대수준도 높아져, 적절한 위해소통에 실패할 경우 막대한 사회적 비용이 유발될 것이다.
  - 고연령일수록 환경성질환인 천식, 만성폐쇄성폐질환에 취약하므로 고령화가 진전될수록 환경성질환 환자의 지속적인 증가가 우려된다.
  - 화학물질의 종류 및 사용량 증가 등으로 어린이에서의 환경성질환 발생이 증가하고 있어,

어린이 건강보호를 위한 보다 실효적 관리가 필요하다.

<표 3-11> 국가 환경 정책방향 변화

구 분	제4차 환경보전중기계획 (‘08~‘12)	제5차 환경보전중기계획 (‘13~‘17)
비 전	녹색국가	환경복지국가
환경보전	사업장 화학물질 배출 저감	전과정 화학물질 관리, 화학사고 예방·대응
기후대기	배출원의 오염물질 관리, 온실가스 감축기반 구축	인체 위해성 관리, 실질적인 감축·적응
물환경	BOD 중심 수질 관리	부영양화(TP), 수생태계 관리
자원순환	폐기물 감량	자원순환사회 실현
자연환경	핵심 생태축 보전	생활 속 생태공간·서비스 확충
상하수도	인프라 확충	도시·농촌 인프라 격차 해소, 도시 침수 예방
환경기술·산업	사전오염예방 기술개발, 환경산업 양적 생산	개발 기술의 사업화 촉진, 글로벌 환경기업 육성

자료: 제5차 환경보전중기계획 (2013)

- (화학물질) 화학물질 등록 및 평가 등에 관한 법률과 화학물질관리법의 시행(‘15년)에 따라 화학물질 관리가 선진화되고, 유해화학물질의 장기노출에 따른 위해성평가가 확대될 전망이다.
  - 약 4만종 이상의 화학물질이 국내에서 유통되고 있으며, 매년 300여종 이상의 신규 화학물질이 유통되는 상황이다.
    - 화학물질 유통량 증가 추이 : ‘06년 417.9백만톤 → ’ 10년 432.5백만톤
  - 가습기살균제 등 생활화학물질의 안전관리 강화 및 화학물질 관련 사고의 예방 등을 위해 화평법, 화관법이 마련·시행됨에 따라, 화학물질의 유·위해성평가 및 노출 관련 연구는 더욱 확대될 예정이다.
- (대기환경) 1차 오염물질(SO<sub>2</sub>, CO) 오염도는 ‘90년대 후반보다 개선되었으나(2000년대 중반 이후는 정체상태), 2차 오염물질 중 NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 오염도는 ’ 90년대 후반부터 개선이 더 되고, 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) 오염문제는 국민 건강을 계속 위협할 것으로 예상된다.
  - 미세먼지 예보는 초기 단계로서, 향후 예보대상 물질 확대 및 예보정확도 향상을 위한 지속적인 연구가 필요하다.
    - ‘14년 2월부터 PM<sub>10</sub> 전국예보 실시 및 ‘14년 5.30부터 PM<sub>2.5</sub> 수도권 시범예보 실시

- 수도권외의 경우, 2024년까지 인구집중의 심화, 에너지 사용량 증가 등의 영향으로 대기오염 물질 배출량은 다소 증가할 전망이다 (환경통계포털).
  - 2010년대비 '24년에 PM<sub>10</sub> 7,610톤(13%), NO<sub>x</sub> 11,110톤(4%), SO<sub>x</sub> 7,880톤, VOCs 17,598톤 (6%) 증가 전망
- (기후변화) 온실가스 배출과 관련한 에너지 소비는 '산업 부문'의 증가율이 '수송', '가정·상업' 등에 비해 높을 것으로 전망된다 (제2차 에너지기본계획, 2014).
  - 2011~'25년간 '산업부문' 에너지 소비 증가율은 2.4% 전망(수송 1.4%, 가정 상업 1.6%)
  - 우리나라의 경우, 21세기 말 기온은 2010년 대비 5.3℃, 해수면은 76cm 상승 전망
- (물환경) BOD 기준 하천 수질은 개선 추세이나 난분해성 유기물질 증가, 녹조현상의 지속적 발생, 반복되는 수질오염사고 등은 건강한 물환경 조성에 있어 불안 요소로 지속될 전망이다.
  - 녹조에 대한 정확한 발생 메커니즘, 과학적 조사 부족 등 근본적인 녹조 대응책을 마련할 필요가 있다.
  - 환경기초시설 확충으로 점오염원 오염 부하는 감소하였으나, 도로·대지·고랭지 등에 의한 비점오염원 부하는 증가 추세를 보인다.
    - BOD 배출부하량 중 비점오염원 비중 전망 ('03년→'20년) : 한강(66.1→72.7%), 낙동강(64.4→66.8%), 금강(76.2→79.8%), 영산·섬진강(70.7→71.2%)
  - 생태하천 복원사업 추진에도 불구하고 수생태계 건강성은 여전히 낮은 수준에 해당된다.
    - 전국 하천 중 30% 이상(960개 지점중 301개 지점) 하천의 수생태계 건강성이 보통 이하 수준이며, 40% 이상 하천의 자연성이 훼손된 것으로 보고된다 (4등급 41%).
- (폐기물) 인구 증가의 둔화로 폐기물 발생 증가 또한 둔화 가능성이 높으나, 장비 등의 생애주기 단축, 대형공사(재개발, 재건축 등) 증가 등으로 사업장폐기물이 증가할 가능성이 잠재한다.
  - 생활폐기물은 재활용 등 감량화 정책으로 감소추세이나('08년 52천톤→'11년 49천톤), 사업장폐기물은 증가추세이다 ('08년 307천톤→'11년 324천톤).
- (국토환경) 도시용지, 1천명당 주택 수, 1인당 주거면적 등이 지속적으로 증가함에 따라 친환경적 녹지공간은 감소할 전망이다 (제5차 환경보전중기종합계획).
  - 도시화율('03년 89%→'20년 95%), 1천명당 주택수('03년 270호→'20년 370)

- (자연환경) 개발에 따른 서식지 감소, 야생 동식물 남획, 외래종 침입, 기후변화 등으로 생물종 개체수는 감소할 것으로 예상된다 (제5차 환경보전중기종합계획).
  - 매년 국내에서 500종의 생물이 멸종할 것으로 추정한다. (국제적 수준 멸종화율 0.5% 적용)
  - 기후변화로 인한 온도상승 등으로 아열대 동식물 증가 등 생태계 변화가 초래되고 있다.
- (상수도) 전국 상수도 보급률은 95.1%에 이르나, 농어촌 지역의 상수도 보급률은 62.2%로서 지속적 추가 확대가 필요하며, 물 수요량은 지속적으로 증가할 것으로 우려된다.
- (하수도) 기상 이변과 도시화에 의한 불투수면의 증가로 집중 호우에 따른 도시지역의 침수방지를 위한 하수관거 기능의 지속적인 보강이 필요하다.
  - '08년 하수관거 연장 총 102,078km, '12년 123,309km
- (토양환경) 실태조사에 따른 토양오염지역 발생정도(기준초과 지점)는 2009년 이후 감소 추세이나, 향후 유류저장시설의 노후, 화학물질 사용량 증가 및 토양오염 조사 확대 등으로 오염토양 발견 지역은 지속적으로 증가될 전망이다.
- (환경산업) 국내 환경산업시장은 성장이 점차 둔화되고('09년 44조→ '10년 55.6조→' 11년 59.4조)되고 있으며, 글로벌 경쟁력이 취약해서 핵심기술개발 및 신규 사업발굴 등을 통한 경쟁력 확보가 필요하다 (환경부, 2010).
- OECD, UN 등 국제기구 등에서는 기후변화, 물부족, 생물종감소, 자원·에너지 고갈, 유해 폐기물 관리 등이 미래사회의 이슈로 부각될 전망이다.
  - 환경기술(ET)의 발달과 더불어 IT(정보통신), BT(바이오), NT(나노) 등과의 융합기술이 발달할 것으로 전망된다.
  - 이에 따라 토양·지하수의 지중환경공간에서 일어나는 환경잠재 위해에 대응하기 위해 융복합적인 접근방식의 새로운 정책방안이 필요하다.
- 국내의 경우, 국민의 삶의 질(복지) 향상과 생태계 건강성 보호와 관련된 환경 분야의 관심과 정책·연구수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.
  - 환경성질환 예방, 화학물질 위해성평가·관리, 대기질 개선, 조류발생 제어, 수생태 건강성 증진, 친환경적 녹지공간 확보, 취약지역 급수시설 확충 등이 필요하다.
  - 토양 및 지하수환경정책의 오염위주에서 미래환경편익을 고려한 정책추진 아이템 도출이 요구된다.

<표 3-12> 토양·지하수환경부문 미래수요

구분	미래사회변화 및 발전전망	미래수요	토양·지하수환경 미래정책·기술 수요
사회	2050년 세계 인구의 약 70 %가 도시에 거주할 것으로 예상	대기 오염, 교통 혼잡, 그리고 폐기물 관리와 같은 도전요소가 중대해질 전망	토지이용의 다양화에 따른 화학적, 생물학적, 물리적 환경유해인자 관리
	특히 북부아프리카 및 남부 아프리카, 남아시아 그리고 중앙아시아에서 지금보다 23억명 이상 증가한 전 세계 인구의 40 % 이상이 심각한 물 부족을 겪는 지역에서 살게 될 것으로 예상됨에 따라 담수 상황을 더욱 긴장시킬 것	제조업과 화력발전, 국내사용 목적의 물 수요가 각각 400%, 140%, 130% 늘면서 글로벌 물 수요가 55% 정도 늘 것	
	유해화학물질의 노출과 관련된 질병이 인구에 미치는 부담이 전 세계적으로 증가하고 있으며, 비OECD 국가들의 화학물질 생산량이 크게 늘 것으로 예상	화학물질의 인체 노출에 대한 평가가 진전을 이루고 있지만 아직도 건강상 영향에 대한 지식은 제한된 수준으로 추가 연구 필요	잠재적인 화학물질 신규오염 및 위해 사전예방
	세계적 질병부담의 상당부분은 조치 가능한 환경 및 생활방식 관련 요인에 기인함	통합 리스크 및 건강 영향 평가 관련 연구의 중점추진에 이어 유해인자 및 기후변화 등 환경적 요인의 인체 영향 관련 연구의 중요성 증대	토양과 지중환경으로부터의 환경위해관리
경제 · 산업	2050년까지 지구 인구는 70억에서 90억 이상으로, 세계경제는 거의 4배 증가하여 약 80% 더 많은 에너지를 사용할 것으로 전망	에너지와 천연자원에 대한 수요가 급증할 것으로 예상	
	에너지수요 증대, 온실가스 저감, 자원 확보 등의 문제 심각성 증대	폐기물 자원화 기술개발은 쾌적하고 편리함을 유지하면서 효율적인 자원순환 기술개발이 요구	
	원가절감을 위한 생산과정에서 저가 환경유해물질들이 일반 생활용품의 생산에 사용될 것이므로 인해 인체에 대한 주요 환경질환 유발물질로 부각될 것	일반생활에서 나타날 인체유해 요인들의 체계적 관리 수요 증가	토양·지하수 오염환경 저감
	국가 온실가스 감축목표 달성에 기여하고 자원순환 사회를 실현하기 위한 관련 기술개발 수요 증가	국내 폐기물 산업은 크게 성장하였으며 지속 성장이 예상되나, 폐기물에너지화 기술은 해외기술 의존도가 높음	

<표 3-12의 계속>

구분	미래사회변화 및 발전전망	미래수요	토양·지하수환경 미래정책·기술 수요
과학 · 기술	지속가능성의 맥락에서 최근 기후변화 이슈의 중요성이 증대됨	기후변화 연구의 집중 분야는 오존층 등 성층권(80년대)과 탄소순환과 생태계 기능(90년대)등을 거쳐 최근 대기오염물질 및 기후변화 예측·대응 등으로 다양화됨	생태계 기반(ecosystem-based)한 기술 및 산업
환경 · 생태	인간 활동에 의한 온실가스 배출 등으로 기후변화에 미치는 영향이 증가하고 있어 이상기후의 영향은 가속화 될 전망	지속가능한 발전을 위한 주요 이슈로 부각되는 기후변화 분야 연구 규모 및 중요성 증대	
	2050년까지 미세먼지 노출로 인한 조기사망자 수가 전세계에서 매년 2배 이상 증가하여 36억명에 이를 전망이며, 대기오염은 조기 사망을 유발하는 세계 1위의 환경요인이 될 것	대기오염 저감, 방지 및 환경성질환 대응을 위한 수요 확대	
	공해 및 기후변화에 더하여 농업용 토지 이용의 변화, 상업용 산림의 확장, 인프라 개발, 인간의 침범 및 자연 서식지의 세분화 등으로 인한 생물다양성 감소	생물다양성과 생태계 서비스에 직접적인 생계가 달린 농촌 빈민과 토착원주민들의 복지 확보	
	전 지구적인 기후변화로 인해 적응력이 약한 생물종이 점점 위협받고 있는 추세이며 2050년에 이르러서는 백만가지 이상의 생물종이 멸종 위협을 받을 것으로 전망	생물다양성 보호 필요성 증대	토양의 기능 및 생태환경관리 생태계서비스 기능 관리
	지구온난화가 심화되고 이상기후 현상이 증가	기후변화를 예측하고 기상을 조절하는 기술의 필요성이 증대	기후변화적응 토양생태계 환경 관리
정치 · 법· 제도	환경법제도의 선진국 수준으로 강화	환경규제 강화	
	통합환경관리 및 재난안전관리	통합적 위해관리	
세부기술분야별 경제사회 및 과학기술 수요 종합		경제사회 수요	산업 활동의 고도화로 신규환경유해인자(화학, 생물, 물리) 잠재적·비예측적 위해 증가 예방 필요
		과학기술 수요	사전예방적 환경관리강화 및 생태계기반기술을 통한 통합적 토양·지하수 기능 및 생태계서비스 관리

## (다) 토양지하수환경 기술산업 인프라분석 및 성과 평가

### ① 토양

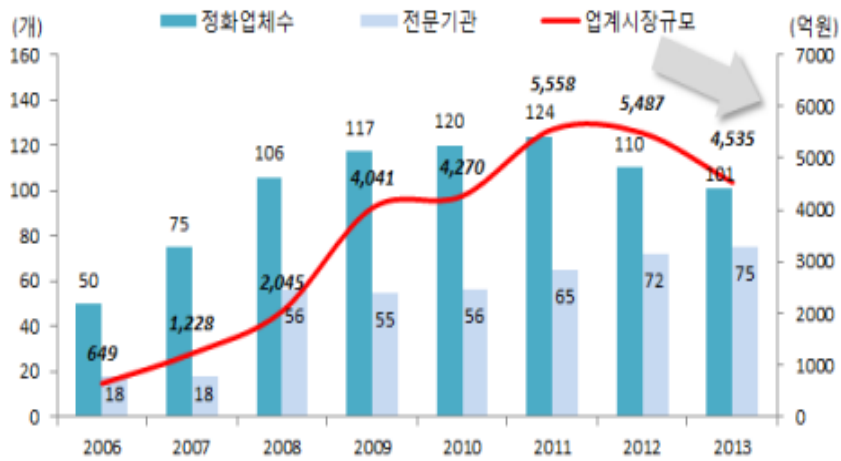
#### ㉞ 토양환경 기술산업 인프라 현황 및 문제점

##### ■ 해외시장 인프라 현황

- 세계시장은 초기 중소기업 위주에서 대기업 위주로 전환되고 있어 국내산업도 소수기업 위주로 변화될 것으로 전망된다.
  - 미국이나 일본 모두 초기에는 중소회사들의 시장점유율이 높은 편이었으나, 시장이 성숙되고 공공부문의 프로젝트 규모가 커지면서 대기업들의 영향력이 커졌다.
  - 미국의 경우 상위 20 개 대형사가 전체 시장의 60%를 점유하고 있으며, 일본의 경우도 상위 10개사가 전체 시장의 67%를 점유하고 있다.
  - 현재 국내 토양정화시장도 선도적인 5~6 개사가 전체시장의 50% 이상을 점유하고 있는 것으로 추정된다.
  - 국내는 아직 중소기업 위주로 토양정화시장이 형성되고 있으나, 향후 시장의 확대와 함께 소수기업 위주의 구조로 재편될 것으로 예상된다.

##### ■ 국내 인프라 현황

- 국내 토양·지하수 시장은 침체와 산업체들의 경영위기로 산업붕괴위기·우려가 대두된다.
  - 국내 토양환경시장이 2012년을 정점으로 지속적으로 감소하고 있다.
  - 국내 토양·지하수 관련 산업체는 토양정화업 등록제도(2005), 누출검사 의무화(2006)로 급격하게 성장하였으나, 2011년을 정점으로 토양정화 업체수 감소 추세(2011년, 124개 ⇒ 2014년, 110개)
  - 공공사업의 경우, 낙찰률이 낮아 업계의 경쟁이 과도함을 반증하며 최저가 입찰제가 업체육성과 산업발전, 건전한 비즈니스 생태계를 저해하는 부작용으로 작용하고 있다.



자료 : 2006-2011 환경산업통계조사 보고서, 환경부, 환경관리공단

<그림 3-25> 연도별 토양·지하수시장규모 추산 그래프

- 세계 토양·지하수 시장의 안정적인 성장에 따른 국내 기업들의 해외시장 진출 노력 가속화 및 효율적 진출을 위한 지원 필요성이 증대되었다.
  - 세계 토양·지하수 정화산업시장은 전체 환경산업시장의 약 5.6%, 환경서비스시장의 12.4%를 차지하고 있으며, 시장규모는 2010년 기준 약 446억 달러로 환경산업 성장률(3.7%)보다 높은 연평균 4.4%의 성장률을 보여주고 있으며 향후에도 안정적으로 성장할 전망이다.
  - 국내 토양·지하수산업체들의 해외시장 진출을 위한 시도가 확대될 전망이나, 해외진출에 대한 경험·역량이 부족한 토양·지하수 산업체들을 위한 효과적인 지원방안 마련의 중요성이 확대되고 있다.
- 정화부지 및 정화토양에 대한 사후관리 법적 근거가 부재하다.
  - 정화부지 사후관리에 대한 관리감독 법적 근거 부재로 정화책임자 및 정화업체가 자체적으로 실시하고 있는 실정이다.
  - 토양에 대한 사후관리 기준 부재로 지하수법에 의한 사후관리로 실시되고 있다.
  - 후속 개발사업 시 정화완료된 부지를 굴착할 경우 법적 기준치를 초과하는 오염토 발견사례가 발생되고 있다.
- 토양정화자문위원회 법적 근거 마련이 필요하다.
  - 위험요소 제거를 위한 토양환경보전법이 개정되었다 (개정: '14.3.24, 시행: '15.3.25)
  - 과중한 정화책임의 완화수단으로 국가의 토양정화비용 재정지원 근거, 범위 및 절차를 마련

해야 한다.

- 토양정화자문위원회의 사업개요를 추가할 필요가 있다.
- 토양정화자문위원회의 운영을 위한 세부 절차, 매뉴얼 등의 마련과 위원회 운영인력 및 예산확보와 홍보, 시스템 구축 종합계획 수립이 필요하다.
- 지하수 수질기준 설정 및 개발가능량 산정에 있어 하천 수생태환경의 지표수-지하수 연계가 고려되지 않은 상황
  - 지하수는 수문순환계상 지표수와 직·간접적으로 연결되어 있어 서로 영향을 줄 수 있고, 비점오염원 등으로 인해 4대강 하천의 수질에 직접적인 영향을 주고 있으나, 실질적인 연계 관리는 부재
- 지하수 오염에 대한 체계적인 정화제도가 미흡하다.
  - 산업단지·공장지역 등 지하수 오염우려지역에 대해 지하수 오염 발견 시 적극적 원인규명 및 정화가 미흡한 실정이다.
  - 지하수 오염 확인 시 오염범위 및 원인에 대한 체계적 조사 및 적극적 대응보다는 이용중지·관정폐쇄 등 일회성 조치에 그치는 경향이 있다.
  - 지하수 오염지역의 신속, 효율적인 지하수 정화복원을 위한 기술개발 역시 미흡한 실정이다.
- 지질·유역·대수층 단위의 장기적 지하수 수질관리가 부재하다.
  - 지역별로 다른 특성을 보이는 지하수 수질의 정확한 지역적 특성을 파악하고 지역단위 지하수 수질평가 및 관리대책을 마련할 필요가 있다.
  - 지하수 오염의 사전예방과 확산을 방지하고 국가 지하수 보전 및 오염지하수 사후관리를 위한 정책 마련에 활용될 수 있다.
- 폐광산 주변지역 광해방지사업 사후 관리체계가 미흡하다.
  - 광해방지사업 완료 사업장 주변 환경오염영향을 확인하기 위하여 사후 환경오염영향조사를 실시하고 있으나, 오염기준을 초과할 경우의 관리체계가 미흡하다.
  - 폐광산 조사(한국환경공단)와 사후 환경오염영향조사(지방청) 주체의 이원화로 광해로 인한 오염지역의 체계적인 사후 관리에 한계를 보이고 있다.
- 토양·지하수 보전관리를 위한 기술개발사업을 통해 기술력 강화에 노력하여 선진기술 대비 74% 수준까지 향상되었다.

- 토양·지하수오염방지기술개발사업(2008~2017)을 통해 국내 토양·지하수 환경시장의 90% 이상을 국내기술로 대체하기 위해 노력 중이다.
- 그간의 연구개발을 통한 현재 기술수준은 분야별로 차이가 있으나 선진대비 2014년 74% 수준에 근접한 것으로 평가되었다.
- 현재 선진국에서 집중 추진 중인 고효율·저에너지 기반의 녹색정화기술 개발은 이제 개념 정립단계이며, 국내 기술수준을 선진국의 90% 수준까지 향상시키기 위한 지속적인 지원이 필요하다.

#### ㉔ 토양환경 기술사업 인프라 수요 및 전망

##### ■ 산업적·사회적 요구

- 토양오염 조기진단, 적시 정화, 토양오염관련 부지이력 관리 등 예방에서부터 사후관리가 가능한 인프라 구축이 요구된다.
  - 토양측정망, 토양오염실태조사 대상, 특정토양오염관리대상으로 실시한 토양 오염도 검사 결과에서 오염 발견률이 증가 추세에 있다.
  - 오염 조기진단, 발견된 오염에 대한 즉각적인 조사 및 정화로 이어지는 체계가 미흡하여 개발지연, 예산 낭비 등의 경제적 손실이 증가하였다.
    - 예: 원주 313유류중대 최초 정화사업비 11억원(1999)→오염 확산으로 111억 원(2008년)으로 증가
  - 토양오염원 정보 및 토양오염 발생, 조사, 정화 등 토양오염 관련 정보의 체계적 관리가 부재하여 오염되었던 부지의 거래 또는 개발과 관련하여 분쟁발생의 소지와 부적정한 개발의 가능성이 있다.
  - 한국환경공단(2014)에서 토양·지하수 오염원 조사사업을 계속 수행 중(2012~)인 상황으로 향후 토양오염 관련 부지이력 관리제 도입의 기반을 구축 중이다.
- 지하수오염을 사전에 인지하고 체계적으로 관리하기 위하여 전국 단위의 지하수 수질측정망 확대 설치·운영 필요성이 제기되었다.
  - 현재 지하수 관정 단위의 개별적 지하수 수질관리가 이루어지고 있는 상황으로 지하수 수질기준 초과 시, 해당 관정 이용중지 등 일회성 조치만이 시행되는 등 근본적인 오염관리에 한계가 있다.
  - 특정지역 지하수 수질자료가 부족한 상황으로 국가 전체적인 지하수 수질 파악을 위해서는

전수조사가 필요한 상황이다.

## ■ 기술적 요구

- 과제 형태 개선
  - 이미 수행된 과제는 관련기술이 발전되고 사회적 여건이 변한 경우에도 중복과제로 수행할 수 없는 문제점이 존재한다.
  - 연구단과 개별 실용화과제 중간 성격의 중형과제(개별 실용화 과제를 2-3개를 하나의 과제로 연결) 도입을 통한 개별과제 간의 유기적 연구개발 강화가 필요하다.
- 기술수요조사 등 과제 기획 보완
  - 현재는 기술수요조사를 기반으로 산업기술연구회에서 차년도 과제에 대한 RFP를 작성하나, 기술수요조사 시 참여가 저조하다.
  - 그리고 현장의 수요 반영도 중요하나 당초 GAIA 사업의 목적에 부합하는 국가 차원의 전략적 과제의 수행도 필요하다.
- 원천기술 비율 저조
  - 당초 GAIA 연구개발사업이 실용화에 전체 예산의 70%를 투입하는 것으로 기획되었으며, 나머지 30%의 예산도 원천기술개발, 공공기반, 기획연구 등에 할애하여야하기 때문에 원천기술에 대한 투자비율이 매우 낮은 상황이다.
- 실용화 과제의 현장 실증 미흡
  - 실용화과제의 경우 현장 실증은 의무사항이나 다양한 이유로 실증부지의 선정이 지연되거나, 제공된 부지가 기술의 특성에 부합하지 않거나, 연구기관과 실증부지와의 지리적 거리로 인해 연구수행이 어려움이 있다.
- 복합오염문제 해결을 위한 통합형 과제 필요
  - 실제 유사한 기술을 대학산업체 등이 공동개발함으로써 상승효과를 얻을 수 있는 경우가 많으며, 한 가지 기술이 아닌 여러 가지 기술의 복합 적용이 필요한 부지도 다수 있다.
- 사전예방적 토양·지하수환경관리 체계를 통합적으로 운영할 수 있는 기술개발이 요구된다.

기존	전망
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양·지하수환경분야 정화기술의 투자대비 실증기술의 확보는 이루어졌으나, 사전예방 및 오염조사 등의 요소기술의 실용화에는 한계점을 가지고 있으며, 신규오염물질, 오염원관리 강화 등의 환경현안정책에 대응하는 중점기술개발 추진이 요구됨</li> <li>- 토양·지하수환경기술은 화학물질 누출에 따른 오염물질 확산 및 제어거동, 처리 등의 환경유해물질의 관점에서만 관리됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 화학사고 대응, 생태적 환경관리의 사전예방 기술과 위해성평가기술의 확보, 정화기술의 고도화, 융합기술의 확대개발</li> <li>- 토양·지하수환경기술개발의 적용 및 활용대상 영역이 다변화 진행중이며, 지중환경관리 체계로 확대전망</li> <li>- 지중환경(subsurface environment)의 지구과학적, 물리·화학·생물학적 환경피해를 사전적, 사후적으로 관리할 수 있는 기술개발 추진</li> </ul>

<그림 3-26> 토양환경기술 전망

- 우리나라는 지형적 영향(유출량 대부분이 바다로 흘러나감) 등 단점이 있으며, 이를 막기 위해 댐 설치로 지표수를 이용 중이나, 추가적 수자원 확보를 위해 현실적 어려움이 있는 댐보다는 다른 수자원 확보 방안 검토 필요성이 대두된다.
  - 대규모 지표수 개발 사업보다 경제적이며, 지하수의 유동 방향과 함양량, 유출량과의 관계만 정확히 파악된다면 영구적인 수자원으로 이용가능하다.
- 국내·외적으로 토양·지하수분야 환경복지에 대한 수요 증가로 지역사회 정화, 잠재 오염 지역 정화 등이 부각되고 있기에 ‘부지특성’ 및 ‘토양오염 R&D 복원 기술의 고도화’를 위한 기술 개발 필요성이 증대되었다.
- 환경생태계 영향을 주는 토양산성화, 유실, 침식, 사막화 등에 관한 관리기술 등 토양의 원기능을 회복시킬 수 있는 기술 요구 사항이 증대되었다.

### ■ 토양환경 기술·산업 인프라 전망

- 토양정화사업과 함께 지하수정화사업 활성화가 요구된다.
  - 토양·지하수 정화사업이 2004년 이후 대책사업 및 국가차원으로 이루어지면서 토양 정화사업 시장이 크게 형성되었으며 지속적인 성장이 요구된다.
  - 토양오염은 지하수오염과 매우 밀접한 관계가 있어 토양정화사업 활성화와 더불어 지하수 정화사업도 활성화 될 것으로 전망된다.
- 토양오염에 대한 국민의 인식향상, 관련제도의 정착, 토양관련 기술 발달 등으로 국가관

- 리 대상 오염부지가 더욱 증가하여 정책수요 요구도 증가하였다.
- 정책 수요자인 국민의 인식변화 및 정책 참여로 토양오염 정화에 대한 국가 주도의 체계적인 토양환경관리 요구가 증가되고 있다.
  - 다양한 화학물질의 사용량 증가에 따라 토양오염이 점차 누적, 확산되고 있어 관리대상 토양오염물질 확대 및 기준 강화가 전망된다.
- 토양오염 관련 부지이력 관리제 도입을 통한 대국민 정보공개 및 토양환경보전정책 수립의 기초자료 확보 필요성 증대가 예상된다.
- 국민의 알 권리에 대한 인식 및 정보공개 요구가 증가할 것으로 전망된다.
  - 토양지하수 오염원 및 토양오염 관련 부지이력 DB 구축을 통한 토양환경정책 수립에 활용 필요성 증대가 예상된다.
- 폐광산 주변지역 사후 환경오염영향조사 효율화에 대한 필요성이 증대될 것으로 예상된다.
- 오염원(광해)이 완벽히 제거, 차단되지 않은 경우 향후 주변지역의 오염 가능성이 상존하며, 이에 따라 효율적 관리를 위한 제도적 장치 마련의 필요성이 증가될 것이다.
- 토양정화자문위원회 활성화를 통한 일자리 창출 및 자발적 토양정화가 유도될 것으로 예상된다.
- 자문회의 과정에서의 관련자료 분석, 현장확인 등 기술적 사항 검토로 토양관련전문기관들에 대한 신규 일자리 및 경제시장 창출도 기여할 수 있다.
  - 오염원인 및 정화책임에 대한 신속하고 정확한 규명으로 시간적, 비용적 손실을 예방하고 합리적, 투명한 절차를 통해 자발적인 토양정화를 유도하고 있다.
- 토지 거래에 따른 토양환경평가(사후관리 및 부지이력 관리)의 단계적인 적용의 의무화가 필요하다.
- 부동산(토지) 거래 시 토양오염에 따른 재산상 손해 방지 및 정화책임을 명확히 하기 위한 노력이 증가할 것으로 예상된다.
- 산업화, 인구증가 등으로 지하수 개발·이용량 증가 및 지하수 수질관리의 중요성, 지하수 오염원 및 오염물질 관리 등에 체계적인 관리의 필요성이 대두될 것으로 예상된다.
- 최근 기후변화로 인한 가뭄 심화와 구제역 발병(가축매몰지 조성), 일본 후쿠시마 원전사고 등 각종 재난, 재해 발생으로 인해 깨끗하고 안전한 지하수의 중요성에 국민적 관심이 증가되었다.

■ 오염조사 및 정화중심 기업 → 토양·지하수환경 전문사업자 확대

○ 환경산업의 정의에서 도출된 토양·지하수 산업의 개념은 다음과 같다.

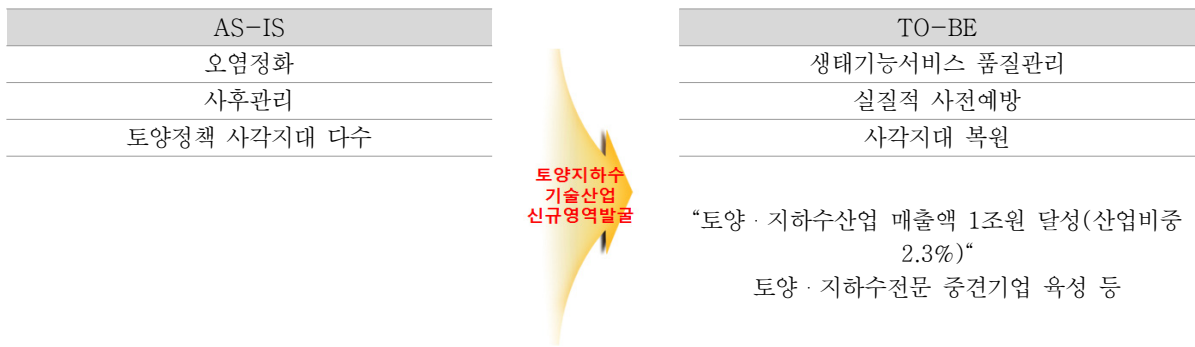
- 주요 국가 및 기관의 환경산업에 대한 정의, 이를 바탕으로 한 환경부의 정의, 환경기술 및 환경산업지원법의 환경산업에 대한 정의 등을 바탕으로 토양·지하수산업에 대한 다음과 같은 시사점을 얻을 수 있다.
- 토양·지하수는 대기, 물과 함께 환경산업의 주요 매체를 이루므로 환경산업의 매체별 하위 산업을 이룬다.
- 환경산업의 주요 기능 사이클은 예방·제어, 조사 및 평가, 정화·복원, 검증, 재활용의 순환 사이클을 형성하며 이는 토양·지하수에도 동일하게 적용될 수 있다.
- 환경산업은 위의 순환 기능을 이루는 기능 서비스 활동 외에 이러한 활동에 소요되는 장비 및 용품의 제조 활동과 이에 관련된 정보나 지식 서비스 활동도 포함되며 이는 토양·지하수 산업에도 동일하게 적용하는 것이 합리적이다.

<표 3-13> 현행 토양·지하수 환경산업 체계 현황

구분	주요업무	현황
전문 기관	토양오염조사 기관	- 토양오염 조사, 토양정화의 검증, 오염토양 개선사업의 지도감독 - 1996년에 업면허 제도 시행 - 현재 76개 기관(23개의 법정기관, 대학교 연구소 또는 산학협력단 222개, 그 외 재단법인 등 비영리기관)
	누출검사기관	- 저장시설, 배관 누출검사 - 1996년에 업면허 제도 시행 - 2008년도 40개사 등록이후 감소추세 - 현재 13개 영리업체 등록
	토양환경평가 기관	- 토양환경평가 - 2011년 업면허 제도 시행 - 현재 41개 영리 및 비영리기관이 등록
	위해성 평가기관	- 위해성평가 - 2013년 업면허 제도 시행 - 현재 5개 비영리기관 등록
정화 업체	토양 정화업	- 오염토양정화 - 2005년 업면허 제도 시행 - 2011년 124개사 이후로 감소하여 현재 93개사 등록(대기업 24개사, 중소기업 70개사)
	지하수 정화업	- 지하수 오염물질을 제거 분해 및 지하수의 수질개선 - 2003년 업면허 제도시행 - 현재 86개사 등록

<표 3-14> 현행 토양.지하수 환경산업 전망상 세부사업내용 발굴 사례

구분	세구분	비고
토양환경보전전문 서비스	토양오염 사전예방	전문기관
	토양오염조사·평가	전문기관
	토양오염정화·복원	정화업체
	토양오염정화검증	전문기관
	토양오염모니터링	
	토양오염관리·재활용	정화업체
지하수환경보전 전문 서비스	지하수오염사전예방	전문기관
	지하수오염조사·평가	전문기관
	지하수오염정화·복원	정화업체
	지하수오염정화검증	전문기관
	지하수오염모니터링	
	지하수오염관리재활용	정화업체
토양· 지하수 환경보전 기기 및 용품제조	토양· 지하수환경보전관련 기기제조	제조업
	토양· 지하수환경보전관련 용품제조	제조업
토양· 지하수환경보전 정보서비스	토양정보서비스	정보서비스업
	지하수정보서비스	정보서비스업
	토양정보 S/W 개발	시스템개발업
	지하수정보 S/W 개발	시스템개발업
토양· 지하수환경보전 지식서비스	토양· 지하수 보전관련 컨설팅	기술, 산업, 정책
	토양· 지하수 보전관련 연구	기술, 산업, 정책



<그림 3-27> 토양.지하수 환경산업육성계획 상 산업 체계 전망

## ② 지하수

### ㉞ 지하수환경 기술산업 인프라 현황 및 문제점

#### ■ 해외시장 인프라 현황

○ 국내 연간 물 이용량은 약 333억㎥이며, 이중 연간 40.8억㎥(12%) 지하수를 이용 중이다.

- 지하수 이용량은 1994년 통계 집계 이후 약 1.5배 증가하였으며, 생활용 및 농업용 지하수 이용량의 증가가 두드러진다.

- OECD 국가의 경우도 지하수 이용률이 꾸준히 증가되고 있다.

\* 북미 약 24%, 유럽 약 21% (OECD 평균 약 22%)

- 특히, 음용으로 사용되는 지하수 비율은 유럽 75%, 미국 51%, 아시아 32%, 중남미 29%로 우리나라에 비해 매우 높다.

○ 아시아, 중동, 아프리카 개도국을 중심으로 경제성장에 따른 내수 및 수출지원을 위한 신규 수자원 수요 및 투자가 급증하는 추세이다.

- 이라크 아르빌 상하수도 현대화 시범사업(지하수분야), 몽골 및 베트남 식수개발사업, 몽골 야르막지역 용수공급 및 수자원이용 효율화사업 등

- 해외 지하수관련 기초자료 부족 등으로 소규모·단일사업에 한정되고 대규모·지속적인 지하수 산업분야 해외 진출에는 한계가 있다.

## ■ 국내 인프라 현황

○ 국내 지하수 관리는 「지하수법」을 근간으로 이루어지고 있으며, 지하수의 이용·개발에 관한 사항은 동법 시행규칙에, 지하수 수질의 보전 및 정화 등은 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」에 규정하고 있다.

○ 먹는 물로 사용되는 암반지하수는 「먹는물관리법」으로 관리하고 있으며, 온천은 지열수로 「온천법」을 통하여 이용·개발 및 관리되고 있고, 기타 지하수 관련 사항을 일부 다루고 있는 법률이 다수 존재한다.

○ 국내 지하수 관련 법령 및 해당 업무의 분산으로 인하여 지하수 관리의 정합성이 미흡하며, 지하수의 이용·개발 중심의 법 체계로 인하여 공공성 확보가 미비한 실정이다.

○ 국내 지하수 산업의 정의 및 범위 규명이 이루어지지 않아 관련 산업의 기술 개발 및 해외 진출을 위한 법적·재정적 지원 제도가 미비하여 지하수 시장의 원활한 발전이 이루어지기 힘들다.

## ④ 지하수환경 기술사업 인프라 수요 및 전망

### ■ 산업적·사회적 요구

○ 지하수 관련 등록기업은 약 4,000여개로 파악되며, 지속적으로 증가하는 추세를 보인다. 내수시장 활성화 및 기술경쟁력 강화를 통해 해외진출 촉진 및 관련 산업의 시장 확대를

지속적인 성장세 발판 마련이 예상된다.

- 지하수관리기본계획에 따른 지하수 관련 등록 기업은 개발·이용업체, 영향조사기관 및 정화업체 3개 모두 증가하는 추세를 보인다.
- 등록 기업들은 업체분류에 따라 중복으로 등록되어 있는 경우가 많아 중복되는 기업을 제외한 실제 전국단위 지하수 관련 업체는 약 4,000개 미만일 것으로 판단된다.
- 세계 물산업의 지속적인 성장 전망으로 국내 기업의 기술경쟁력 강화, 내수시장 활성화를 통한 강소기업의 육성 및 해외진출 촉진, 물산업 육성정책의 추진 기반 마련 등을 위한 글로벌 물산업 육성전략이 추진 중이며, 그에 따라 지하수 시장 역시 지속적인 성장이 기대된다.

## ■ 기술적 요구

- 지하수 관련 기술의 개발, 지하수 개발 공사, 지하수 오염 조사 및 정화, 지하수 관리 및 관측 등 지하수의 개발·이용, 조사·분석 및 관리 등 기술산업활동에 지하수개발과 보전기술이 요구된다.
- 제조업, 개발 및 공사업, 정화 및 복원업, 도매업, 서비스업, 시험 검사 및 분석업으로 구분하여 해당하는 표준산업을 분류하면 다음과 같다.
  - (제조업) 지하수의 취수를 위한 수중 모터펌프, 지하수 오염방지장치 등 제조
  - (개발 및 공사업) 생활용수 및 산업용수의 공급, 상하수도 공사, 수질방지시설 공사, 지하수 개발공사, 지하수 관련 장치 개발, 우물 공사 등
  - (정화 및 복원업) 환경오염관련 재생, 토양·지하수 정화 및 복원 등
  - (도매업) 모터펌프, 파이프, 지질장비, 시료채취장비 등 유통
  - (서비스업) 종합기술엔지니어링, 지반조사, 지질조사, 환경용역, 설계 및 감리 등
  - (시험 검사 및 분석업) 지하수 영향조사, 수질 검사 분석, 기술진단 등

## ■ 지하수환경 기술·산업 인프라 전망

- 지하수대상영역이 천층과 심층영역으로 확대됨에 따라 관련 기술개발 신규이슈 영역 대응이 필요하다.
- 토양지하수, 광산피해복구, 표토관리, CCS 환경관리, 지열에너지 활용 등 다양한 환경관리 영역에 대한 환경관리 요소가 강화될 필요가 있다.
- 천층 및 심층지중환경에서 발생하는 다양한 환경문제에 대한 논의 및 새로운 영역 개발에

기존 추진 한계가 많다.

<표 3-15> 지하수환경 관련사업

관련사업 영역	사업내용	지중환경 범위
토양지하수오염방지기술개발사업	화학물질 누출에 따른 토양지하수 환경오염관리에 중점	천층지중환경
광해방지기술개발사업	광산지역에 한정된 토양지하수환경, 농작물 오염, 지반침하, 미세먼지, 소음진동, 환경복구(토양, 산림 등) 등 환경피해 복구	
표토환경관리	토양지하수오염방지기술개발사업에서 일부 연구단 지원 등에도 토양환경자원의 관리를 위한 기술개발은 지원 한계	
지중시설 환경관리	상하수도관망 및 지중매설 시설, 건물 등의 환경안전관리	
CCS 환경관리	심층지중환경에서 인공적인 이산화탄소 주입에 따른 환경관리	심층지중환경
지열에너지, 온천 등 환경관리	지열 및 온천 개발이용에 따른 환경관리	
기타 지질학적 지반환경변화 모니터링 및 기타응용기술	지하땅굴, 핵실험, 고층건물 건설 등 지중교란작용에 따른 지중환경 모니터링 및 문제개선기술 필요	

○ 지하수산업 측면에서 지하수의 특성을 고려한 환경질 관리가 필요하며, 다음과 같이 고려될 수 있다.

- 기존의 토양 조사·평가, 오염토양정화, 지하수 조사·평가, 지하수오염조사·정화, 지하수 영향조사, 지하수개발이용
- 오염 진행 현상의 인지 어려움으로 환경문제 부각 지연
- 오염의 진행이 느리고 정화에 많은 시간과 비용 소요
- ‘부지마다의 특성(Site Specific)’ 으로 조사분석, 정화 방법론 상이
- 지하수는 확산이 빠르게 진행되며 오염위치가 유동적으로 변화

- 지하수기술산업의 향후 기술산업적 방향은 다음과 같다.
  - ‘공공재를 대상’ 으로 하는 기술산업’
  - 원인 행위에 의존하는 ‘파생수요 기술산업’
  - 법규 의존적인 ‘인위적 시장창출 산업’ 으로 ‘정책 의지’ 중요
  - 다양한 기술이 요구되는 ‘기술 중시형 복합기술산업’
  - 경제발전예 따라 성장하는 ‘선진국형 산업’ 및 장기적인 ‘미래 성장 산업’

### ③ 성과평가

#### ㉞ 토양

- 현행 토양환경관련 법적 근거는 토양환경을 포함하여, 농지법, 산림법 등에 규정하고 있으나, 토양의 질을 농업 생산, 산림관리, 건설관리 등의 관련목적에 따라 직접적으로 토양을 관리하고 있다.
  - 토양환경질은 국가 토양환경관리의 총괄적인 컨트롤타워로서 토양환경보전을 명시한 환경부의 정책기능을 중심으로 수행될 필요가 있다.
  - 따라서 토양환경의 질을 나타내는 성과지표는 국가 토양환경의 질을 전체 대표할 수 있는 목표로 설정되어야한다.
  - 다만, 토양의 이용목적(환경, 농업, 산림, 건설 등)을 고려하면서 환경의 질을 고려할수 있는 지표로 검토할 필요가 있다.

<표 3-16> 토양환경관련 법률

법률명	주요 내용	토양질 보전 항목
토양환경보전법	토양생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리보전하도록 규정함. 토양보전기본계획의 수립, 토양 오염도 측정, 토양오염의 규제, 토양오염대책 지역의 지정과 관리, 토양관련전문기관 및 토양정화업 등을 규정	· 토양조사항목이 토양환경보전법 제6조의 2에 규정되어 관리
도시공원 및 녹지 등에 관한 법률	공원녹지 기본계획, 도시녹화 및 도시공원녹지의 확충, 도시공원의 설치 및 관리, 도시자연공원구역, 녹지의 설치 및 관리 등을 명시함	· 법 제24조, 제38조 도시공원과 녹지 내 토석의 채취 시 해당지자체장으로부터 허가 규정 · 시행규칙 제9조, 제18조 공원과 녹지설치기준에 시설이 설치되지 않는 부지에 나무, 잔디 그 밖의 지피식물 녹화 명시
농지법	농지의 소유·이용 및 보전 등에 필요한 사항을 정함으로써 농지를 효율적으로 이용하고 관리하여 농업인의 경영 안정과 농업 생산성 향상을 바탕으로 농업 경쟁력 강화와 국민경제의 균형 있는 발전 및 국토 환경 보전에 이바지하는 것을 목적으로, 토양개량에 관한 규정을 명시함	· 제21조(토양의 개량·보전)에 따른 토양을 개량·보전하는 사업 등을 수행
산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률	산림자원의 조성과 육성, 산림경영계획, 도시림 등의 조성관리, 산림사업의 시행, 산림자원의 조사 및 기술개발, 산림자원의 이용, 산림의 공익기능 증진 등을 명시함	· 법 제43조 토석이나 토사의 유출 붕괴 방지를 위해 보안림 지정 기능 명시 · 법 제45조, 시행령 제49조 보안림에서 제한하는 행위로서 절토, 성토 또는 정지 등 토지의 형상을 변경하는 행위, 토석을 굴취채취하는 행위 규정 · 법 제45조, 시행령 제49조 벌채 후 토사 등이 유출되지 않도록 조치하지 않을 경우 신고
산지관리법	산지의 합리적인 보전과 이용을 통해 임업의 발전과 산림의 다양한 공익기능을 도모하기 위해 보전산지의 지정, 행위제한, 토석채취 등을 규정함	· 법 제25조~제31조, 제35조, 시행령 제32조, 시행규칙 제24조에서 토석채취 허가 및 토석채취제한지역 안에서의 행위제한과 석재 및 토사의 매각, 토사채취신고 등에 대한 규정
자연환경보전법	자연환경보전기본계획의 수립, 생태경관보전지역의 관리, 생물다양성의 보전, 자연자산의 관리, 생태계보전협력금 등을 규정함	· 제37조 생태계 훼손면적의 산정 방법으로 1항에서 토양의 토양층을 제거굴착 또는 성토하여 토지 형질변경이 이루어지는 행위를 정의하고 있음
환경정책기본법	환경보전기본계획의 수립, 사전환경성검토 등을 명시함	· 제3조 4항에서 토양의 유실을 환경훼손 중 하나로 정의하고 있음
건설산업기본법	건설공사의 조사설계시공감리유지관리기술관리 등에 관한 기본적인 사항과 건설업의 등록, 건설공사의 도급 등에 관하여 필요한 사항을 규정	없음

- 환경부의 경우, 토양침식 현황조사 추가(토양환경보전법 제6조의 2, 2011년) 상수원 보호 구역, 수변지역에 대한 토양질 관리는 일부 시행중이며, 토양환경의 질을 관리하는 환경 정책은 토양의 생태기능 보전 관점으로 확대될 필요가 있다.
- 토양오염유발시설이 설치되어 있거나, 오염우려 지역을 중심으로 조사와 정화(심토 위주)등이 집중되어 있어 현행 토양 및 준설퇴적토 등에 대한 관리는 지속적으로 확대될 전망이다.
- 토양을 자원으로 인식하여 오염물질 위주의 관리에서 토양의 유출방지, 사토발생의 최소화 및 사전예방, 재활용 등의 토양의 양적·질적 관리를 위한 제도적 기반 마련이 요구되며, 이에 따른 성과목표 설정이 필요하다.

<표 3-17> 토양환경의 질과 관련된 성과지표

항목	세부항목	적용성	
		환경정책 부합성	환경기술 적용성
토지 이용	물 보유 능력	지목별(논, 밭, 과수원, 시설하우스, 초지 등)	○
	토지이용면적	지목별(논, 밭, 과수원, 시설하우스, 초지 등)	
	토지피복정도	지목별, 피복시기별	○
	작물재배면적	재배작물별	
	작물재배적지	재배작물별 재배적지, 재배작물별 주산단지 추천	
	농지관리	경지정리면적, 영농지구구분, 농지이용현황, 농지이용계획, 농지적성구분, 생산기반정비계획	
토지 정보	물리적 성질	토성, 침식도, 경사도, 유효토심, 배수정도	
	토양적성등급	지목별 5개 등급	
	화학성분함량	pH, EC, 유효인산, 치환성 이온, 유기물 등 토양유기탄소	
	토양생물다양성	생물종 개체수	
	토양미생물분포	미생물상: 세균, 방선균 등, 미생물체량: Biomass C	
	중금속함량	Cd, Cu, Pb, As, Ni, Cr, Zn 등	○
	농약잔류량	성분별	
	양분함량	질소, 인산	
토양침식	경운방법별 농경지 면적 또는 비중, 침식에 의한 농업 침전물이 농업외 환경에 미치는 기여도, 물에 의한 침식, 바람에 의한 침식, 경운에 의한 침식, 토양침식의 사회적 비용		
물관리 및 수질	물관리	농경지(논, 밭 등) 관개용수 및 배출수(유거수) 관리	○
	물수지	논물 수지, 밭물 수지	○
	수자원 부족량		○
	농업용수 수요량	논, 밭, 시설재배지, 과수원 수요량, 축산 수요량	
	농업용수 사용강도	논, 밭, 시설재배지, 과수원 용수, 축산용수	
	농업용수 수리시설	저수지, 양배수장, 보, 집수암거, 관정	
	관개용수 화폐가치		
	농업용수의 상대적 가치	상수도, 하수도 요금과 비교	
	유출량	양분유출량(논, 밭 등)	
	농업용수 수질 (하천보, 호소, 지하수)	기초수질 항목, 유기물 지표, 영양염류, 양이온, 기타 음이온, 중금속류 등	
	수생 생물다양성		○
	농약성분함량		○
	병원균		○

<표 3-17의 계속>

항목	세부항목	적용성	
		환경정책 부합성	환경기술 적용성
생물 다양 성	유전적 다양성 (유전자원 보존현황)	작물별, 미생물별, 축종별	
	생물종다양성	야생종, 비토착종	
	생태계(서식지) 다양성	농경지, 산림, 도시, 공장지대 등	
	멸종위기종	작물별, 미생물별, 축종별	
	천적 개체수		
	서식지 행렬	토지용도별 생물개체수 다양도 지표	
	자연자본지표	종풍족도와 서식구조	
농장 관리	양분관리	INM 실시 면적 및 비중	
	농약관리	IPM 실시 면적 및 비중	
	토양관리	토양보존 실천 면적 및 비중	
	물관리	물 보존형 관개지 면적 및 비중	
	경관 관리	자연적·문화적 경관 관리 계획하의 농가수(면적) 및 비중	
	환경친화적 농장관리	친환경농업 인증농가수, 면적, 생산량 등	
	농장관리 능력	친환경농업 교육 프로그램 참가 농가수 및 비중	
	총농업 연구예산에서 친환경농업 관련 연구비가 차지하는 비중		
양분 수지	양분수지	질소, 인산 수지	
	양분잉여도	질소, 인산 잉여	
	가축밀도	축종별	
	가축사육두수	축종별	
	성분별 가축분뇨 발생량	질소, 인산(축종별)	
	가축분뇨 처리실태	처리방법별	○
	가축분뇨 처리시설 보유 현황	처리방법별	○
	성분별 화학비료 사용량	질소, 인산	
	작물 양분흡수량	질소, 인산	

<표 3-17의 계속>

항목	세부항목	적용성	
		환경정책 부합성	환경기술 적용성
대기 및 기후 변화	농경지 온실가스 배출량	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O/작물별	
	농경지 온실가스 흡수량	CO <sub>2</sub> /작물별	
	축산부문 온실가스 배출 량	CH <sub>4</sub> /축종별	
	연료연소 온실가스 배출 량	CO <sub>2</sub> /배출원별	○
	암모니아 및 산성화물질 배출량	NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	
	메틸 브롬화물 사용량	오존고갈 잠재력	
	기상정보		
농업 경관 및 농경 지 생태 계 기능	농업 경관	경관구조, 농업경관의 기능, 농업경관의 금전 적 가치	○
	농경지 생태계 기능	농업토양 및 농경지 물 보유능력, 관개 및 배수 시설의 물 보유능력, 토지사태 경감정도	○
농약 사용 및 위해 성	농약 품목수	농약종류별/용도별	
	농약 출하량	농약종류별/용도별	
	농약사용량	농약종류별/용도별	
	농약잔류량	작물별	○
	농약 위해성 평가	농작업자에 대한 위해성, 소비자에 대한 위해 성, 생태계(환경)에 대한 위해성	○
농업 에너 지	재생불가능 에너지 소비	종류별, 용도별	
	재생가능 에너지 소비	종류별, 용도별	
	재생가능 에너지 생산량		
	총에너지 투입량		
	에너지효율		○

#### ㉞ 지하수

- 지하수 수질의 개선과 친환경적 지하수 이용과 관련, 지하수 수생태관리와 지하수물관리 체계의 지하수 환경 위협요인에 대한 성과지표 설정이 요구된다.

- 기존 지하수수질환경정책 지표는 지하수수질개선과 먹는샘물 관리강화를 위한 지하수수질 측정망 시설개선 추진을, 샘물사용량 감소율, 지하수수질전용측정망 유효데이터 취득건수 등 지하수 수질의 향상을 위한 정책에 한정되었다.
- 지하수정책의 실패리다임에 따라 생태적으로 건강한 지하수환경 조성과 물순환 건강성을 고려한 지하수관리기반 구축해야한다.
- 건강한 지하수환경조성은 위해기반의 지하수오염관리와 오염배출시설중심 오염원관리를 통하여 지하수의 생태적 건강성 확보를 해야 한다.
- 이를 위한 지하수관리는 단순 오염관리 측정망에서 생태적 건강성과 물순환 건전성을 관리 할 수 있는 측정망 구축을 통해 지하수환경정보를 고도화할 수 있다. 그리고 지하수 이용관 점에서 친환경적 이용을 촉진하고, 해외 지하수기반 구축을 지원하는 정책목표를 설정할 수 있다.

<표 3-18> 지하수환경정책 성과지표

지하수환경정책 성과지표		세부항목
건강한 지하수환 경 조성	위해성기반 지하수오염물질 관리	- 위해성 기반 신규·잠재 미량수준이 지하수오염물질 관리 탐색 및 모니터링 체계 운영
	지하수환경 영향시설 관리	- 지하수수질 오염 배출시설 및 잠재적 오염발생 시설관리
	지하수의존 생태계 관리	- 지속가능한 지표수-지하수의 자원·환경적 가치 향상을 위한 생태적 건강성 확보
지하수 관리기반 구축	지하수 수질관리 측정망 구축	- 단순한 지하수 수질의 항목에서 탈피하여 지하수의 생태적 건강성과 물순환의 건전성을 확보를 위한 측정망 확대
	지하수환경 정보화	- 지하수환경 기초자료 관리시스템 구축 - 수질오염 예경보시스템 구축 - 지하수 오염부하량관리시스템 구축 - 물환경 기초자료 분석시스템 구축 - 물환경 정책지원시스템 구축
	고부가가치 먹는물	- 좋은 물 개발을 위한 과학적 기반 확대
	산업 육성화 지원	- 동남아, 동유럽, 중남미 등 개발국에 지하수관리 기반 구축 해외진출

## (2) 주요 OECD국가의 토양·지하수환경 정책과 이슈

### (가) 유럽연합

#### ① 배경

- 유럽 연합(European Union, EU)는 유럽의 28개 회원국으로 이뤄진 연합으로 1993년 11월 1일 마스트리흐트 조약에 의해 설립되었으며 전신은 유럽경제공동체(EEC)이다.
  - 1957년 초대 회원국은 네덜란드, 서독(독일), 룩셈부르크, 벨기에, 이탈리아, 프랑스 총 여섯 국가이었으며, 이후 1973년에는 그린란드를 제외한 덴마크, 아일랜드, 영국이, 1981년에는 그리스, 1986년에는 스페인, 포르투갈이, 1990년에는 독일이 통일되어 동독 지역이 유럽 연합의 회원국이 되었다.
  - 1995년엔 스웨덴, 오스트리아, 핀란드가, 2004년에는 라트비아, 리투아니아, 몰타, 슬로바키아, 슬로베니아, 에스토니아, 체코, 키프로스, 폴란드, 헝가리가 가입했으며, 2007년 1월 1일에는 루마니아, 불가리아가 가입했으며, 2013년에는 크로아티아가 28번째 회원국이 되었다.
  - 2016년 6월 23일 영국이 탈퇴를 결정하면서 유럽 연합 사상 최초로 이탈하는 사례가 발생하였다.
- 유럽연합의 총 인구는 510,056,011명(2016년 기준)이며 전 세계 국내 총생산 23% 정도를 차지한다.
  - 인구밀도는 116.4인/km<sup>2</sup>이다.

#### ② 토양질 현황 및 정책

- 유럽연합은 토양을 재생가능하지 않은 대단히 복합적인 자연자원으로 토양의 특성을 15가지로 보고 있으며(Council of Europe, 1972; EC, 2007) <표 3-19 참조>, 이를 주요한 위협요인을 토양오염, 토양침식, 유기물질의 감소, 토양의 다짐, 염화, 사태, 표토의 차폐, 생물다양성 감소 등으로 간주하고 있다 (Montanarella, 2008; EC, 2007; Turbé et al., 2010).
  - 유럽연합 국가에서 52백만ha (전체 면적의 16%)에서 심각한 토양 훼손이 발생했음이 보고된다 (EC, 2002; EEA, 2015; EU, 2013).

<표 3-19> EU에서 인식하고 있는 토양의 특성

토양의 특성	
1	- 토양은 지구의 가장 외곽으로 암석과 부패되는 동식물 등으로 형성
2	- 토양은 다양한 함량의 유기물질(생물체의 분해에 기인하는), 광물질과 영양물질을 포함
3	- 토양은 우리가 마시는 물과 숨쉬는 공기의 정화를 돕고 있음
4	- 토양은 평균적으로 45% 광물질, 25% 물, 25% 공기, 5% 유기물질로 구성되어 있다. 토양에 포함되어 있는 모래, 찰니, 진흙 등의 광물질의 구성정도는 토양의 조직을 결정
5	- 상층토양은 가장 생산적인 층임
6	- 상층토양 10톤은 1ha 부지에 1유로동전의 두께로 덮혀질 수 있음
7	- 상층토양 2cm 자연적으로 형성하는 데 500년이 걸림
8	- 토양 1ha에 5톤의 동물들이 살 수 있음
9	- 진균과 세균은 토양의 유기물질을 분해
10	- 토양의 작은 동물(지렁이 등)은 유기물질을 섭취하고 영양물질을 순환시키며, 상층 토양을 풍요롭게 함
11	- 뿌리는 토양의 조직을 성그럽게 하고 산소를 제공한다. 이러한 활동은 동물이 살아가는 데 이익이 된다. 또한 토양을 침식으로부터 보호
12	- 토양은 홍수의 위험성을 줄이고 잠재적인 오염물질을 걸러냄으로써 지하수를 보호한다. 1ha의 토양부지에는 3,750톤의 물을 저장
13	- 토양과학자들은 유럽에 10,000여종의 다양한 토양이 존재
14	- 세계적으로 토양은 1조5,500억 톤의 유기탄소를 함유하고 있음. 비교; 대기는 7,600억톤을 함유하고 있으며, 살아있는 생물의 탄소량은 5,600억톤
15	- 토양은 세계에서 인간이 만들고 방출한 이산화탄소의 20%를 포획

자료: Council of Europe (1972); EC(2007)

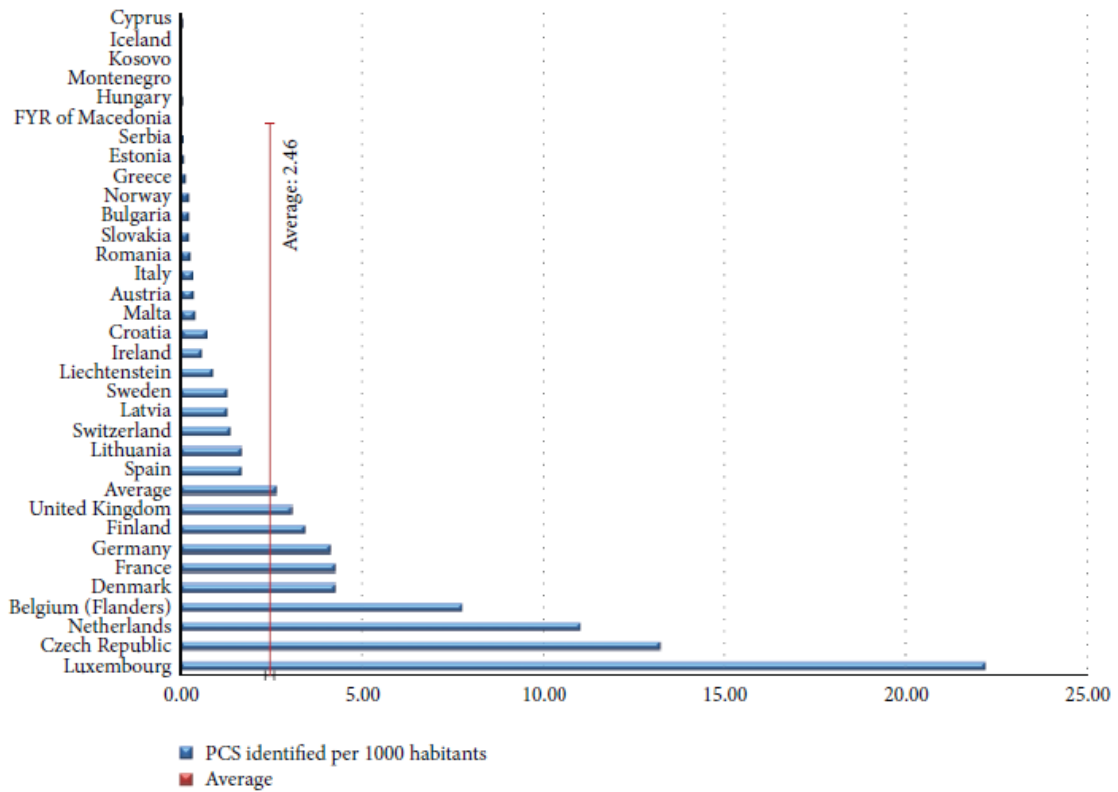
## ㉞ 토양질 현황

### ■ 토양오염

- 유럽(EEA 33개 회원국과 6개 협력국, European Environment Information and Observation Network (EIO-NET) 가입국)에서 토양오염은 지속적으로 나타나고 있으며 250만 개소가 잠재적인 토양오염부지이며, 이중 14% 정도인 34만개소가 복원이 필요한 오염부지일 것으로 추정되고 있다 (Panagos et al., 2013; van Liedekerke et al., 2014).

※ EEA 회원국은 33개국으로 28개 EU국가와 아이슬란드, 리히텐슈타인, 노르웨이, 스위스, 터키임. EEA 협력국가는 알바니아, 보스니아&헤르체고비나, 코소보, 마케도니아, 몬테네그로, 세르비아이다 (UN Security Council Resolution 1244/99).

- 이러한 오염은 유럽 인구 1,000명당 2.46개소의 잠재오염부지가 존재하는 것과 같다.



자료 : ESDAC (2016), Panagos et al.(2013)

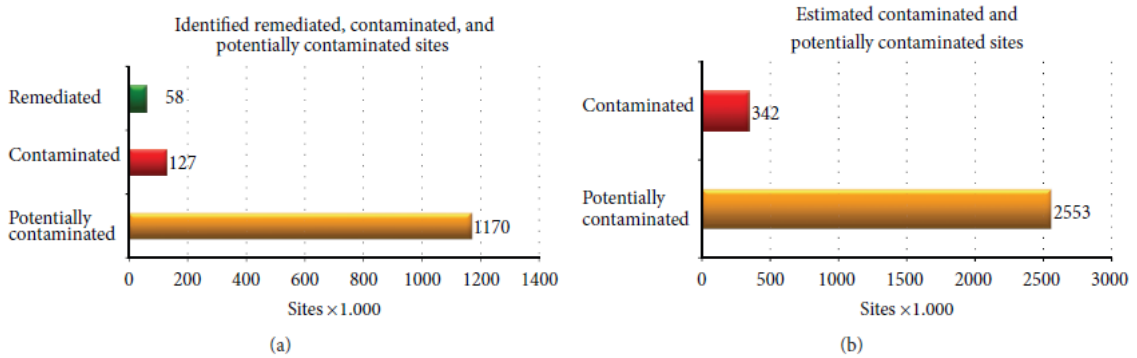
<그림 3-28> EU 국가의 인구 1000명당 잠재오염부지

- ‘잠재오염부지’는 EU 회원국가별과 각국에서 잠재적 오염부지를 어떻게 정의하는가에 따라 다르다. 예를 들면, 룩셈부르크, 벨기에, 네덜란드, 프랑스는 잠재적인 오염행위가 일어난 부지를 잠재오염부지(PCS, Potentially Contaminated Site)로 취급한다. 반면, 오스트리아, 헝가리, 노르웨이는 잠재오염의 증거가 있을 경우 잠재오염부지로 인식된다.
  - 잠재오염부지의 다른 요인은 국가별로 잠재적 오염부지의 규모를 달리함. 예를 들면 국가별로 i) 국가적 수준에서 잠재오염부지를 정의하는 경우, ii) 지하저장탱크 유출의 작은 규모의 부지를 오염부지로 포함시키는 경우가 존재한다.
- 실제 유럽연합 27개국에서 약 2.5백만 개소의 잠재오염부지가 조사되었으며, 이는 39개 EEA 국가의 45%에 해당. 잠재 오염부지의 1/3 정도인 34만2천개소가 오염부지이며, 이중 15%가 정확된 부지이다 (Panagos et al., 2013).

<표 3-20> 유럽연합 국가의 잠재 오염부지와 오염부지

	확인된 잠재오염부지(PCS) 및 오염부지 (CS)(a)	산정된 PCS (b)	산정된 CS(c)	계(d)
대상국가	33	12	11	38
인구	487,152,449	177,412,672	57,568,148	612,117,243
부지면적(km <sup>2</sup> )	4,460,305	1,552,984	833,188	5,772,075
조사대상인구	79.6%	29.0%	9.4%	
조사대상면적	77.3%	26.9%	14.4%	
잠재오염부지(PCS)	1,169,649	739,968		2,553,000*
PCS/1000인	2.4	4.2		
오염부지(CS)	127,475		32,601	342,000*
CS/10,000인	2.62		5.7	
정화부지(RSs)	58,336			
RS/10,000인	1.20			

자료: Panagos et al.(2013)

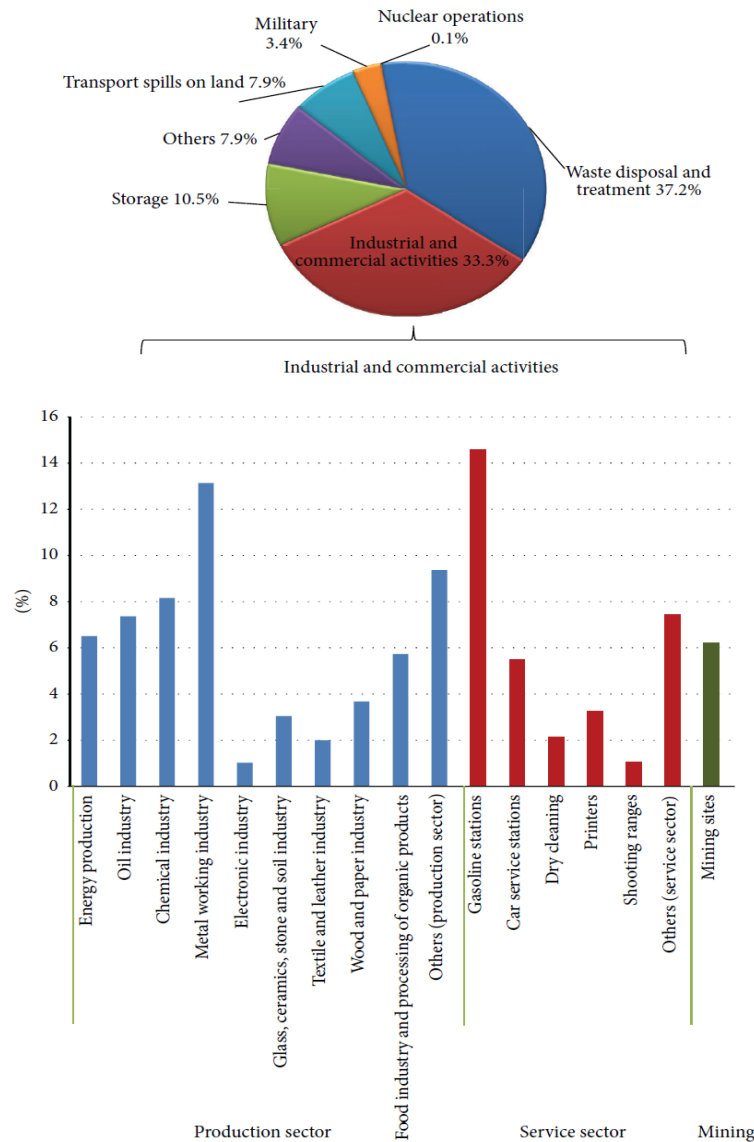


자료 : Panagos et al.(2013).

주: 이 수치에 대해 van Liedekerke et al.(2014)는 유럽 각국에서 오염부지의 정의와 해석이 같지 않으므로 국가별 오염 부지에 대한 수치를 일괄하여 사용하는 것은 적정하지 않을 수 있음을 지적하고 있음

<그림 3-29> 유럽의 (a)확인된 정화 부지 수(RS), 33개국에서 보고된 잠재오염부지 (PCS) 및 오염부지 수(CS). (b)38개국을 대상으로 추정된 잠재오염부지 (PCS) 및 오염부지 수(CS)

- 유럽연합 27개국의 오염부지 중에서 도시 산업폐기물 처리 및 매립부지가 전체 오염부지의 38%를 차지하고 있으며, 그 다음으로 산업·상업 활동에 의한 토양오염부지가 34%를 차지하고 있음. 오염물질별로는 유류 및 중금속에 의한 오염이 전체의 60%를 차지하고 있다 (Panagos et al., 2013).



자료: Panagos et al.(2013).

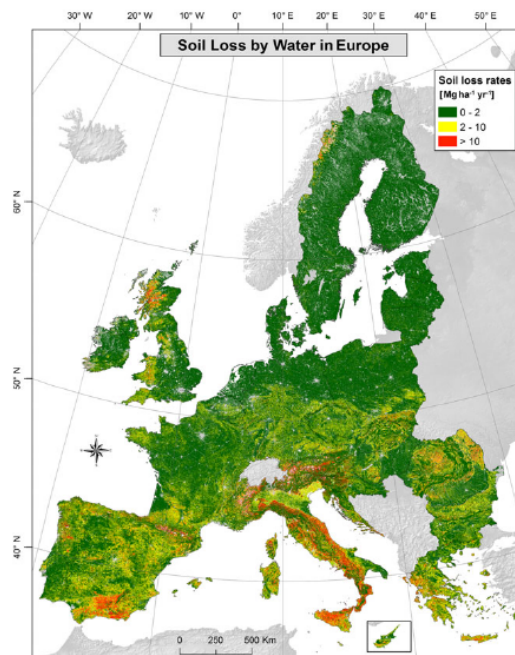
주: 이 수치에 대해 van Liedekerke et al.(2014)는 유럽 각국에서 오염부지의 정의와 해석이 같지 않으므로 국가별 오염부지에 대한 수치를 일괄하여 사용하는 것은 적정하지 않을 수 있음을 지적하고 있음

<그림 3-30> 유럽의 산업·상업활동에 의한 토양오염부지의 구분

- 오염부지의 관리에 매년 약 60억 유로가 사용되고 있을 것으로 산정한 바 있다 (Panagos et al., 2013).

## ■ 토양침식

- 토양침식은 유럽 토양의 46.3%에 영향을 미치고 있으며, 이러한 토양유실은 산림의 황폐화, 농경지의 질 저하로 연결된다.
  - 유럽에서는 매년 평균 1ha에서 17톤이 침식작용으로 유실되며, 기후변화에 의해 발생이 늘어난 돌풍 등에 의한 토양의 침식은 매년 20~40톤/ha에 달한다 (Turbé et al., 2010).
  - 유럽 토양의 침식: 26백만 ha의 물에 의한 침식, 1백만 ha의 바람에 의한 침식(Olderman et al., 1991; EC/JRC, 2015)

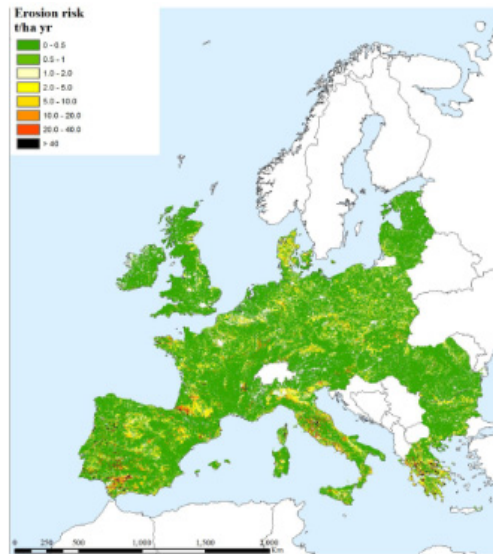


자료: Panagos et al. (2016)

<그림 3-31> 유럽에서 물에 의한 토양의 유실(2010년도 기준)

- 유럽지역에서의 토양침식은 자연적인 토양형성양(매년 1ha에서 1톤의 토양)의 37~57배에 해당(Jeffery et al., 2010)하며, 유럽에서 토양의 침식은 지난 30년간 농업의 집약화와 지속 가능하지 않은 한계 토지의 이용 확대로 증가되었고, 최근의 누적된 기후 변화로 재해 기상의 빈도가 증가, 집중 강우와 가뭄 시기의 이동 등도 토양의 물과 바람에 의한 침식 증가의 한 원인으로 지목되고 있다.

- EC 27개국과 인근 유럽 국가들의 토지 피복을 공간적으로 분류한 CORINE (Coordination of Information on the Environment) 프로그램(1987년 시작함)은 유럽지역을 3단계의 CORINE 그룹으로 분류하고 이를 44개 소규모로 분류하고, 전 면적을 1:100,000 규모로 유럽의 토양의 질을 조사 및 평가하였다 (CEC, 21992; EEA, 2015, Wikipedia, 2015).
- 유럽 지역의 88.0%의 토양에서 물에 의한 침식 위험량은 2톤/ha/년 이며, 3.3%의 토양에서 10톤/ha/년 이상이다 (Strebotnjak, 2010).
- 유럽 공동체의 남부 지역에서 토양 침식 위험 평가 및 분포도(EEA, 2015; CEC, 1992; ESDAC, 2016)에 의하면, 19%의 농촌 지역 토지가 고침식 위험도에, 그리고 36%의 토지가 중침식 위험도로 분류된다.
- 지중해 연안 지역의 토양 침식은 15톤/ha/년 상회할 정도 매우 토양의 질이 심각하게 훼손되고 있다.
- 벨기에 국가 토지의 18%에 해당하는 600,000 ha의 토지가 침식의 영향을 받은 것으로 추정된다.
- 포르투갈과 스페인에서는 주로 남서부 전체 토지의 1/3이 고침식 위험으로 분류되는 지역으로 이들 대부분은 농촌 지역에서 발생하는 것으로 평가되었다 (CEC, 1992).
- 그리스 농촌 지역 토지의 20%가 고침식 위험지역이며 전체 토지의 1/3에 해당하는 면적이 토양 침식의 영향을 받았다 (CEC, 1992).
- 이탈리아에서는 농촌 지역 토지의 10%가 고침식 위험도로 분류된다 (CEC, 1992).
- 터키에서 74%의 토지가 물 또는 바람에 의한 침식 위험에 노출, 이 면적은 56.6백만 ha에 달한다 (EC, 1992).
- 영국의 웨일즈 지역 농경지의 10-15%가 수용 한계 이상의 잠재적 고침식 가능 지역으로 지정하였다.



자료: Strebotnjak (2010)

<그림 3-32> PESERA(Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) 모델에 의한 유럽의 토양 침식 위험도

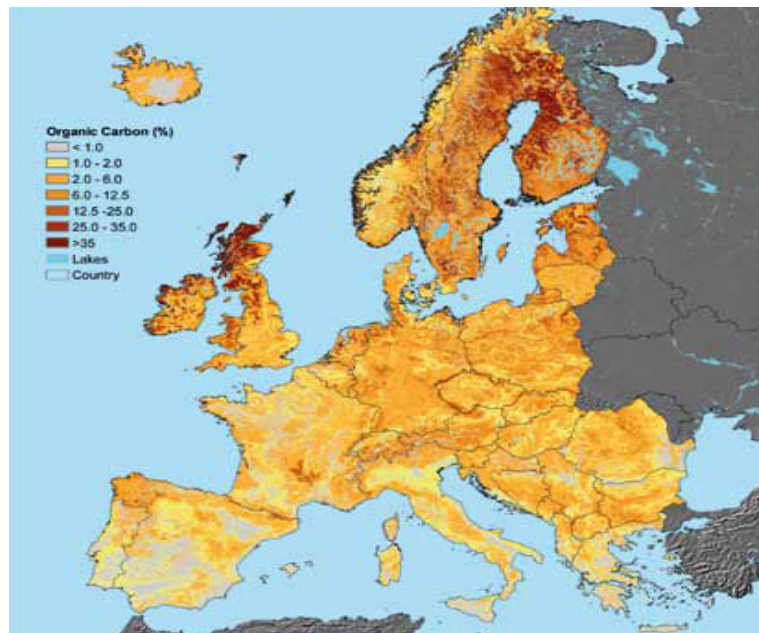
## ■ 토양유기물질

- 토양의 비옥도를 결정하는 토양의 유기물질 함량이 감소하고 있다.
  - 세계적으로 매년 2 기가톤(200억톤)의 탄소가 토양유기물질로 축적되고 대기 중으로 8기가톤의 탄소가 방출되고 있으며 (Lal, 2000), 유럽의 일부 지역 토양의 유기물질은 세계적으로 인식되고 있는 토양유기탄소(soil organic carbon) 임계함량인 2%(토양의 유기물질(soil organic matter) 함량으로는 약 3.4%정도 낮다 (Kemper and Koch, 1966; Huber et al., 2008; Verheijen et al., 2005; Goidts and Van Wesemael, 2007; Panagos et al., 2013).

<표 3-21> 유럽 국가들의 SOC 함량 (EIONET-Soil 자료)

국가	1km cells 수치	Area coverage with SOC value (%)	Average SOC content 0-30cm (%)	Max SOC content 0-30cm (%)	Std. dev. (%)
오스트리아	55,329	64.8	2.7a	53.3	3.3
불가리아	14,101	12.6	2.1	71.6	1.0
덴마크	42,917	100.0	2.0	58.0	1.5
에스토니아	13,379	28.4	3.5	53.4	4.6
아일랜드	1322	1.8	13.3	55.8	14.1
이탈리	30,521	10.0	3.1	22.5	2.3
네덜란드	29,866	77.3	3.5	19.3	2.6
노르웨이	14,249	4.1	3.2	19.7	3.1
폴란드	220,090	70.1	2.6	49.7	4.0
세르비아	1181	1.3	2.0	21.7	1.6
슬로바키아	26,959	54.0	1.3	50.0	1.1
스위스	105	0.3	4.5	39.9	5.6

주: a는 2.1% using only grid cells with >50% agricultural cover.  
 자료: Panagos (2013)



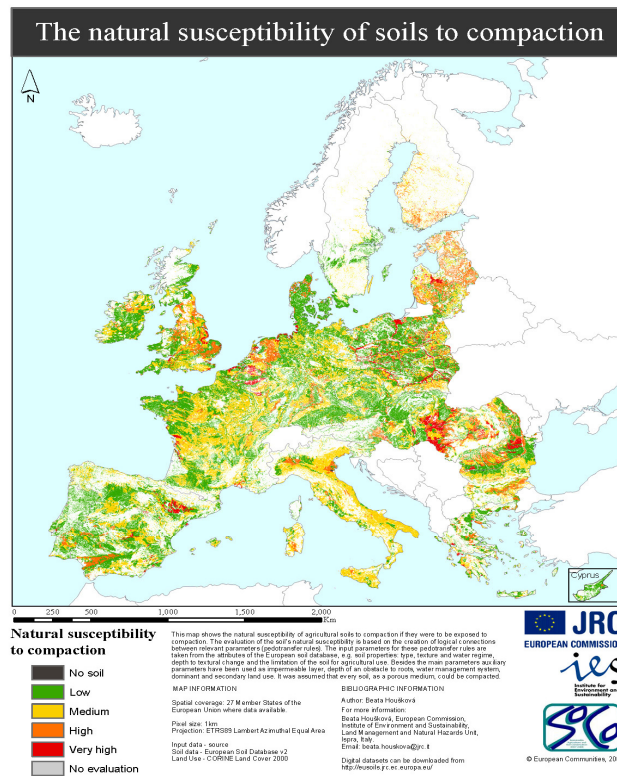
자료: LIFE Environment (2014)

<그림 3-33> 유럽국가 토양의 유기물함량

- 유럽에서 토양에서의 탄소함량 감소는 토양의 사막화와 연계되어 발생하며, 특히 이탄지역에서의 온실가스방출이 지구의 기후변화에 중요한 영향을 미치고 있다 (EEA, 2010; EEA, 2010).

## ■ 토양다짐

- 유럽토양의 36%(대부분이 농경지임)가 토양의 다짐(compaction)에 취약하다 (ESDAC, 2016).
  - 1991년 유럽에서 토양답압은 3천3백만ha를 초과하였다.
  - 최근 중앙과 동부 유럽토양의 토양다짐으로 2천5백만ha는 약한 상태로 다짐이 발생, 3천6백만ha에서는 심한 토양다짐이 발생했다.

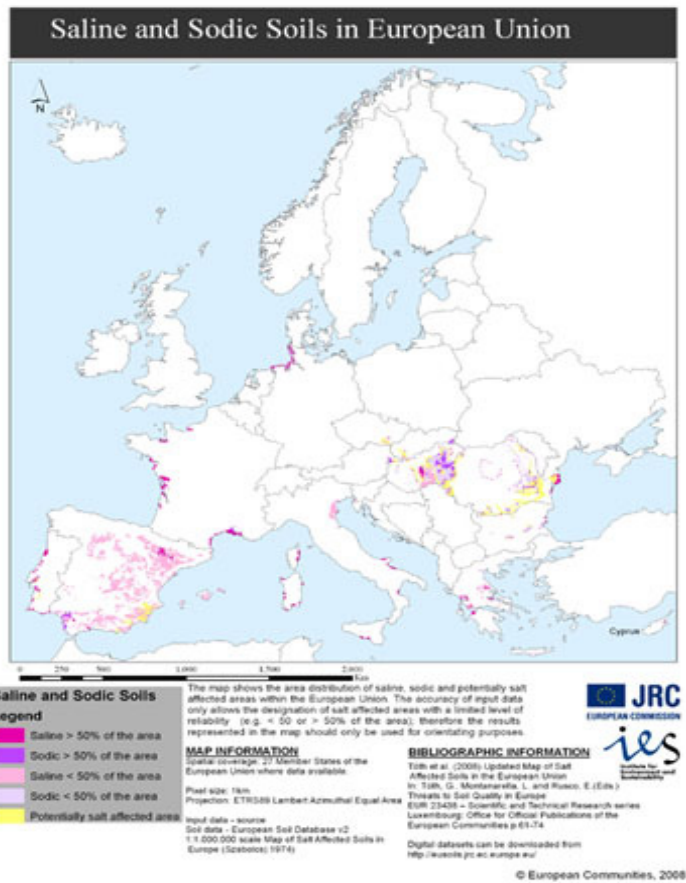


자료: Beata Houšková (2008)

<그림 3-34> 자연적으로 토양다짐에 민감한 유럽 지역의 토양 분포

## ■ 토양의 산성화염화

- 유럽의 28백만ha의 토양이 염화되어 생산성이 낮아지고 있다 (EEA, 2010).
  - 주로 지중해 국가에서 발생하며,
  - 인위적인 부적절한 농경방법은 토양중의 수용성 염기를 증가시키고, 이는 토양질을 훼손시키어 사막화 발생을 촉진하였다.

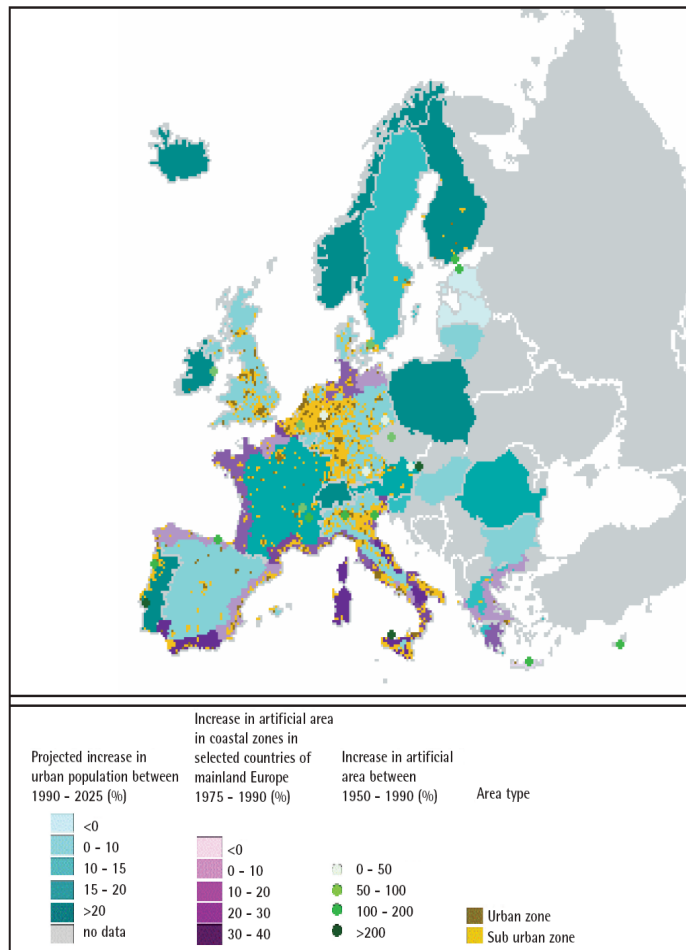


자료: Toth et al (2008)

<그림 3-35> EU 국가의 토양 염화 현황

## ■ 토양차폐

- 주로 도시지역의 도로 건설, 건물 건축 등의 부지 이용변화(land-take)에 의해 발생하는 표토의 차폐(sealing)는 토양과 지하수의 오염으로 이어지며, 경우에 따라서는 지역의 홍수를 유발시킨다.
- 주택, 시설, 산업 및 상업부지, 운송부지 및 시설, 도로와 철도 등에 의해 유럽지역 토양의 9%가 불투수층으로 물의 흐름을 막고 있으며, 이러한 차폐지역에서 토양오염이 발생한다 (Umlauf et al., 2005).
- EU 27개국에서 1990년-2000년 기간 중 매년 1,000km<sup>2</sup>(275ha/일)의 면적이 차폐되고 있으며, 차폐되는 토양의 면적은 매년 5.7%가 증가(176,150→186,200km<sup>2</sup>)하였다 (Prokop et al., 2011).



Probable problem areas of soil sealing in Europe (Source European Environment Agency)

자료: ESDAC (2016)

<그림 3-36> 유럽의 토양차폐 민감지역 (짙은 갈색 및 황색지역)

<표 3-22> 유럽연합 27개국 회원국의 토양차폐의 압력, 현상, 반응

국가	압력(pressure) (2000-2006)	현상(state) (차폐율)	반응(response)	정책목표
말타	유의성이 없으나 부지 이용 증가 및 인구 증가	13%, 높음	수단 이행 없음	N
네덜란드	인위적인 표토면적이 인구증가 보다 빠르게 증가	8.1%, 높음	다양한 수단 이행	Y
벨기에	부지 이용 감소, 인구 증가	7.4%, 높음	다양한 수단 이행	Y (Flanders)
독일	부지의 이용, 인구 정체	5.1%, 높음	다양한 수단 이행	Y
룩셈부르크	연간 부지 사용 감소, 꾸준한 인구 증가	4.9%, 높음	다양한 수단 이행	Y
사이프러스	부지 이용 증가가 인구 증가보다 빠름	3.6%, 높음	수단 이행 없음	N
덴마크	부지 이용 증가가 인구 증가보다 빠름	3.6%, 높음	다양한 수단 이행	N
영국(연방)	부지 이용 감소, 인구 증가	3.4%, 높음	다양한 수단 이행	Y
헝가리	부지 이용 증가, 인구 감소	3.2%, 높음	수단 이행 없음	N
체코	부지의 이용 점차 감소, 인구 정체	3.2%, 높음	다양한 수단 이행	N
포르투갈	부지 이용 증가가 인구 증가보다 빠름	3.1%, 높음	초기 수단 이행	
프랑스	연간 이용부지 감소 및 인구 증가	2.8%, 중간	초기 수단 이행	Y
이태리	연간 이용부지 감소 및 인구 증가	2.8%, 중간	초기 수단 이행	N
폴란드	부지의 이용 점차 감소, 인구 감소	2.4%, 중간	초기 수단 이행	N
슬로바키아	부지의 이용 점차 감소, 인구 정체	2.4%, 중간	다양한 수단 이행	N
리투아니아	연간 이용부지 증가 및 인구 감소	2.2%, 중간	수단 이행 없음	N
오스트리아	연간 이용 부지감소 및 인구 증가	1.9%, 중간	다양한 수단 이행	Y
불가리아	연간 이용부지 증가 및 인구 감소	1.8%, 중간	수단 이행 없음	N
슬로베니아	부지의 이용 증가, 인구 침체	1.8%, 중간	다양한 수단 이행	N
아일랜드	부지의 이용 점차 감소, 꾸준한 인구 증가	1.6%, 낮음	초기 수단 이행	N
루마니아	부지의 이용 증가, 인구 감소	1.6%, 낮음	수단 이행 없음	N
스페인	부지의 이용이 인구 증가보다 빠르게 증가	1.4%, 낮음	초기 수단 이행	N
그리스	그리스	1.3%, 낮음	수단 이행 없음	N
라트비아	부지의 이용 증가, 인구 감소	1.1%, 낮음	수단 이행 없음	N
에스토니아	부지의 이용 증가, 인구 감소	0.9%, 낮음	수단 이행 없음	N
핀란드	유의성 없는 부지의 이용, 인구의 증가	0.6%, 낮음	초기 수단 이행	N
스웨덴	유의성 없는 부지의 이용, 인구의 증가	0.4%, 낮음	다양한 수단 이행	N

<표 3-23> EC에서 간주하고 있는 토양질의 훼손에 의한 비용부담 사례

구분	부지 이용자들의 부담비용	사회적 부담 비용
오염	- 부지의 가치 저평가 - 보험 비용 증가 - 산업부지에서의 작업자 보호비용 증가	- 오염부지에서의 사람건강증진 비용 증가 - 오염지표수 또는 지하수의 처리비용 - 식품안전비용 증가
침식	- 토양의 생산성 감소 - 침수피해 증가 - 침식에 의한 2차 경제적 피해 발생 (예, 관광, 버려진 부지 등)	- 하천 오염준설토 등의 제거, 처리 등 - 기초시설 피해(도로, 물공급시설 등) - 물처리시설 필요 - 침식에 의한 2차 경제적 피해 (관광, 버려진 부지 등)
유기물질 감소	- 토양의 생산성 감소 - 생산성 비용 증가(추가되는 관개와 토양비료 등에 의한)	- 토양에서의 온실가스 배출 증가에 따른 비용 - 지표수와 지하수 처리 비용 - 홍수로 인한 피해비용
염화	- 토양의 생산성 감소 - 염화 및 염화로 인한 침식에 의한 2차 경제적 피해 발생 (예, 관광, 버려진 부지 등)	- 천층 지하수 염화에 의한 운송기초시설 피해 - 물공급 기초기반시설 피해 - 염화 및 염화로 인한 침식에 의한 2차 경제적 피해 발생 (예, 관광, 버려진 부지 등)
사태	- 토양의 생산성 감소 - 지하유류 및 화학물질보관 시설 피해에 의한 오염처리 - 기초기반시설피해	- 사람의 생명과 복지 피해 - 기초기반시설 피해 - 도로시설 훼손 등 사람의 경제활동 피해 - 지하유류 및 화학물질보관 시설 피해에 의한 오염처리

자료: EC(2006)

#### ㉠ 토양질 보전 정책

○ 토양환경보전에 관한 EC 국가들의 인식은 1980년부터 나타나기 시작하면서 1980년 후반 네덜란드의 토양보호법을 시작으로 하여 여러 국가에서 법제도의 기반이 갖춰지고 토양을 보전하기 위한 프로그램이 운영되기 시작했다.

- 1907년 아이슬란드의 토양보전서비스 설립
- 1987년 네덜란드의 토양보호법
- 1989년 이탈리아의 토양보호법
- 1992년 체코슬로바키아의 토양보호법
- 1993년 프랑스의 국가토양복원 및 정화정책 수립
- 1997년 헝가리의 국가환경프로그램
- 1998년 독일 연방토양보호법

- 2004년 잉글랜드와 웨일즈의 토양보호 이행계획
- EC는 2002년 제6차 환경 이행 프로그램(Sixth Environment Action Programme, EAP)에서 토양의 질을 보전하기 위한 ‘Thematic Strategy on Soil Protection’ 을 채택하였으며, 2006년 EU에 토양을 보전하기 위한 규정(EU Directive) 마련에 대한 제안서를 제출한 바 있다.
  - 제6차 EAP는 토양의 다양한 기능을 이해하고, 토양 변이성과 복잡성, 토양의 질이 훼손되고 있는 여러 경로에 대해 토양의 질을 보전하는 전략을 담고 있다.
  - 제6차 EAP의 전략은 첫째, 제도의 기반 구축; 둘째, EC 및 다른 국가들의 통합적인 토양보전 정책의 수립; 셋째, 국가의 기초 정책으로서의 토양에 관한 연구 증진; 넷째, 토양을 보전하기 위한 국민의 인식 증진의 축으로 구성되어 있다.
- 2006년 EC는 EU에 토양을 보전하기 위한 규정(EU Directive) 마련에 대한 제안서를 제출한 바 있으며, 이 EU 규정(안)에는 EU 국가들이 효율적으로 자국의 토양과 토양의 생태계서비스 기능을 보전하기 위한 내용이 포함되었다.
- 2013년 11월20일 EU는 제7차 환경이행프로그램(The 7th Environment Action Programme, 7th EAP)을 유럽의회 결정(Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013)으로 채택하였다 (EU, 2013).
  - 제7차 EPA는 2050년 “지구의 생태적인 한계 내에서 우리가 잘 사는 것” 을 비전으로 하여, 2020년을 목표로 하고 있다.
    - 제7차 EAP는 ‘Living well, within the limits of our planet’ 을 프로그램의 모토로 하고 있으며, 토양을 여러 자연환경 매체에 연결되어 있으며, 6개의 원칙(환경과 사회적 고려에 대한 균형, 세대 간의 평등, 세대 내에서의 평등, 환경적 한계, 공공의 참여, 협치)하에 토양에 대한 독립적인 보전정책보다는 다른 매체들과 연결된 통합적인 정책 이행을 제시하고 있다.
    - 제7차 EAP는 자연자원과 환경관리 그리고 지속가능한 개발(sustainable development), 환경정책통합 (Environment Policy Integration)이라는 개념을 바탕으로 우선접근주제로 9개의 우선 목적(Priority Objectives) 부문을 담고 있으며, 토양질의 훼손으로부터 토양을 보호하고 보전하여 EU국가의 자연자산(Natural Capital)을 제고해야 함에 대해 제1 우선 주제(Priority Objective 1)로 다루고 있다.
  - 토양을 보호하고 보전하는 수단 또는 요소로 제도적인 이행 제고(제4 우선목적), 지식기반을 증진시키는 정보 증진(제5 우선목적), 환경과 기후변화정책에 대한 현명한 투자 제고(제6 우선목적), 환경요구와 고려에 대한 완전한 정책통합(제7 우선목적)을 제시하였다.

<표 3-24> EU 제7차 환경이행프로그램(EAP)의 9개 우선목적

우선 목적	내용	비고
1	- 유럽연합 회원국 자연자본(Natural Capital)의 보호, 보전 및 증진	- 이 목적은 토양, 부지와 바다, 육수와 깨끗한 공기, 자연자본을 지원하는 생물다양성의 보호, 보전과 생산성을 높이는 데 있음. 유럽연합과 회원 국가들은 유럽의 수자원을 보호하기 위해 2020 생물다양성 전략과 청사진을 빠르게 이행을 의무로 하고 있음
2	- 유럽연합 회원국을 자원효율적이며, 녹색경제 및 경쟁력 있는 저탄소경제 국가로 전환하도록 함	- EAP는 EU 회원국 들이 자원효율적이고 저탄소 경제로 전환하기 위해 획기적으로 에너지 사용을 줄임으로써 2020년 이후 기후정책을 준비할 수 있도록 하는 것임. 또한 음식물쓰레기를 감소하고 바이오매스를 지속가능하게 이용하는 등의 환경 이슈를 포함하여 소비에 의한 환경영향을 감소시키는 데 있음. 수자원의 더 효율적인 이용과 폐기물을 자원으로 전환시키는 내용을 포함하고 있음
3	- 유럽연합 회원국의 국민의 건강과 복지를 환경오염과 위해성으로부터 보호	- EAP의 우선순위에는 깨끗한 공기와 물, 소음, 화학물질 등 인간의 건강과 복지를 포함하고 있음
4	- 효과적인 이행을 통해 유럽연합 환경제도에 의한 이익을 최대화함	
5	- 유럽연합 환경정책을 위한 지식과 증거 기반정보 (ESDN, 2013)를 증진시킴	- ESDN 2013. Quarterly Report N32 on the 7th Environment Action Programme
6	- 환경과 기후 정책을 위한 투자를 확보하고 환경적인 재무 외형을 확보	
7	- 환경 통합(Integration)과 정책의 응집력을 증진시킴	
8	- 유럽연합 도시의 지속가능성 제고	
9	- 국제적 환경 및 기후와 연계된 도전사업에 유럽연합의 효율성을 높임	

자료: End & Berger (2014)

○ EU는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 방출에 의한 기후변화와 토양의 비옥도를 결정하는 토양의 유기물질 함량을 관리하기 위한 토지의 이용 변화, 농경지 이용 방법 변화 등을 위한 CAP(Common Agricultural Practice)정책과 더불어 토양의 탄소를 관리하기 위한 토양관리 전략을 마련하였다.

- EU는 토양의 탄소를 관리하기 위해 토지를 5개 부문으로 구분하고 부문별 토양의 생물유기탄소의 저장 기능을 높이고 방출을 관리할 수 있는 연구사업 프로그램(EU LIFE

Environment)을 통해 효용성을 제고하고자 하였다.

※ LIFE Environment은 European Commission (DG Environment and DG Climate Action)이 관리하며, 유럽연합(EU)이 환경과 기후변화 이행 정책을 지원하기 위한 기금을 조성하기 위해 1992년 시작한 프로그램으로 1기(1992~1995), 2기(1996~1999), 3기(2000~2006), LIFE+(2007~2013)로 구분되며, 이 프로그램은 3,954개 프로젝트를 협력 지원(31억 유로). LIFE multiannual work programme(2014-2017)은 11억 유로를 환경부문 3.6억 유로를 기후 이행에 기여하였다.

<표 3-25> 토양의 탄소를 관리하기 위한 EU LIFE Environment 2014의 토양의 탄소관리 부문

부 문	
작물재배지	생물(유기)탄소의 토양 회귀를 농경수단 제고
	경작 및 농경 잔재물 관리
	물관리
	농산림 관리
목초지	가축의 방목 정도
	목초의 생산성
	산림·목초지의 불 관리
	종(species) 관리
산림	종(species) 선발
	생물개체 수 관리
	최소 부지 사용
	산림병 관리 및 잡초 관리
	생산성 증가
	훼손으로부터의 보호
	수확 잔재물 제거의 방지
이탄 토양의 사용	천층 지하수 관리
	경작지의 목초지 전환
관리·비관리 관목지대와 이탄부지	대수층 관리
	pH(석회방출) 및 비옥화
	화전
	방목

자료: LIFE environment (2014)

<표 3-26> EU LIFE Environment 2014의 토양의 탄소 관리 주요 과제

탄소 저장, 24 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cross-border wet ec. Cross-border recovery and conservation of wet ecosystems</li> <li>- Grassland restoration and marsh protection in Egyek-Pusztakócs - Restoration of Dry grasslands (Magredi) in four Sites of Community Importance of Friuli Lowland</li> <li>- Action Plan for conservation and restoration of three woods in the Flemish Ardennes</li> <li>- Kinnekulle Kinnekulle plateau mountain - restoration and conservation</li> <li>- Conservation of Otis tarda in Hungary</li> <li>- Waterlogging and grassland extensification in Lower Saxony to improve habitats of the Corncrake (Crex crex) and the Black-tailed Godwit (Limosa limosa)</li> <li>- Ausseerland Natural wood lands, bogs and habitat network around Aussee</li> <li>- Re-wetting of the Ochsenmoor on the Dümmer</li> <li>- Westliche Dümmerniederung Re-wetting of the Western Dümmer fen area</li> <li>- Restoring raised bogs in Ireland</li> <li>- Restoration of raised bogs in Denmark with new methods</li> <li>- Restoration and grassland management of Felső-Kongó meadows - Conservation and restoration of calcareous fens in Friuli</li> <li>- Restoring active blanket bog in the Berwyn and Migneint SACs in Wales</li> <li>- Hannoversche Moorgeest Re-wetting valuable raised bogs in the northern Hannover Region</li> <li>- Soil and Surface water protection using conservation tillage in northern and central Europe</li> <li>- Sustainable agriculture in Carbon arithmetics</li> <li>- Introduction of new olive crop management practices focused on climate change mitigation and adaptation</li> <li>- Regenerative agricultural practices: demonstration of an alternative sustainable management of agrarian soils</li> <li>- Technologies to stabilize soil organic carbon and farm productivity, promote waste value and climate change mitigation</li> <li>- Combating climate change through farming: application of a common evaluation system in the 4 largest agricultural economies of the EU</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

- 유럽 농경지의 토양질을 위협하고 있는 토양 침식, 농약 및 비료 사용 등에 대한 농경방식 등을 지속가능한 농업으로 개선하기 위한 정책을 지원하고 프로그램을 운영하고 있다.
- Soil Thematic Strategy (STS)에서 지적하고 있는 가장 중요한 토양의 훼손요인은 농업이며, 이를 벗어날 수 있는 수단으로 Common Agricultural Policy (CAP)와 지속가능한 비료와 농약의 사용 등에 관한 제도를 제안하였다.

<표 3-27> EU LIFE Environment 2014의 토양보전을 위한 지속가능한 농업 정책지원 과제

지속가능한 농업, 43 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quality and respect for environment</li> <li>- Crops for better soil Profitable organic farming techniques based on traditional crops: contrasting soil degradation in the Mediterranean</li> </ul>

지속가능한 농업, 43 프로젝트

- Life Strategies for Organic- and Low-input-farming to Mitigate and Adapt to Climate Change
- Innovative approach for the participation of the farming sector in EMAS and the experimentation of new formulas to create specialized employment formulas
- Environmental and Sustainable Management Systems in Extensive Agriculture
- Soil and Surface water protection using conservation tillage in northern and central europe
- Integrated management of agriculture in the surroundings of community importance wetlands (sustainable wetlands)
- Optimisation of nitrogen management for groundwater quality improvement and conservation
- Sustainable and integrated soil management to reduce environmental effects
- Innovative hybrid MBR-(PAC-NF) systems to promote water reuse
- Regenerative agricultural practices: demonstration of an alternative sustainable management of agrarian soils
- Helping enhanced soil functions and adaptation to climate change by sustainable conservation agriculture techniques
- Co-composting procedures and its use on afforestation, landscaping and forestry and agricultural crops in the Andalusian region
- Biocompost Demonstration Plant for composting municipal sewage sludges and rice straw, and evaluation the agronomic quality of the produced compost
- PIGS- Pig-Farm Integrated Management Project
- Development and implementation of codes of good agricultural practices to reduce point source and diffuse pollutions in the Peron catchments area
- Zero Nuisance Piggeries
- Water Resources Management in Cooperation with Agriculture. Compilation and Implementation of Integrative Programmes of Measures According to the WFD to Reduce Diffuse Pollution from Agriculture - Integrated Protection of Surface and Groundwater in Agricultural Regions
- Environmentally-friendly management of swine waste based on innovative technology: a demonstration project set in Aragón (Spain)
- Sustainable management of livestock waste for the removal/recovery of nutrients
- Valorization of the digestate from pig manure as new fertilizers with an organic /mineral base and gradual release
- New technology capable of extending current application of bioremediation to soil contaminated with chlorinated compounds, pesticides, PCBs and PAHs.
- Elimination of PCBs from the Food Chain through Bioremediation of agricultural superficies
- Environmental Friendly Technologies for Rural Development
- Strategies to improve and protect soil quality from the disposal of olive mills' wastes in the Mediterranean region
- Sustainable strategies for the improvement of seriously degraded agricultural areas: The example of Pistachia vera L.
- Demonstration of alkaline hydrolysis as a new technology for remediation of pesticide contaminated soil and groundwater
- Water Pollution Reduction and Water Saving Using a Natural Zeolite Cycle
- Innovative System for the Biochemical Restoration and Monitoring of Degraded Soils
- Surface Water Protection Against Diffuse Crop Protection Products Release
- Remediation of agricultural diffuse nitrate polluted waters though the implementation of a permeable reactive barrier (NITRABAR)
- Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution and phytoremediation in artificial wetland ecosystems

지속가능한 농업, 43 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Creation and restoration of aquatic ecosystems for improvement of water quality and biodiversity in agricultural basins</li> <li>- Farms for the future: Innovation for sustainable manure management from farm to soil</li> <li>- Demonstration of innovative soil washing technology for removal of toxic metals from highly contaminated garden soil</li> <li>- Implementation of eco-compatible protocols for agricultural soil remediation in litorale domizio-agro aversano nips</li> <li>- ‘Strategic plan for the adaptation and application of the principles for the sustainable use of pesticides in a vulnerable ecosystem’</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

- EU는 토양의 비옥도와 탄소의 저장, 그리고 토양의 생태계서비스에 중요한 역할을 제공하고 있는 토양생물다양성을 복원하기 위한 정책을 지원하고 프로그램을 운영하였다.
  - EC(2010)에 의하면 토양생물다양성을 위협하는 요인으로 토양의 훼손, 토지이용관리의 변화, 기후변화, 화학물질에 의한 오염, 유전자변형생물체(Genetically Modified Organisms)를 확인하였고, 이들 위협요인으로부터의 토양 훼손을 방지/저감하기 위한 정책과 연구를 지원하였다.
    - 토양에서의 물과 산소의 흐름을 결정하는 토양의 공극(porosity)과 공극의 분포 등을 훼손하는 경작방법을 관리하고,
    - 토양침식과 산성화, 침입외래종 등 토양생물다양성을 위협하는 요인으로부터 토양생물 다양성을 복원 및 보전하기 위한 연구 프로그램을 지원하였다.

<표 3-28> EU LIFE Environment 2014의 토양생물다양성을 보전 및 복원하기 위한 주요 과제

생물다양성, 13 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grassland restoration and marsh protection in Egyek-Pusztakócs</li> <li>- Conservation actions for priority bird life in Lake Salso Oasis</li> <li>- Dry Grassland in Denmark - Restoration and Conservation</li> <li>- Restoring semi-natural habitat types to a total cover of site Helnæs</li> <li>- Restoring dry grasslands at Bøjden Nor with a positive influence on vulnerable coastal lagoon habitat status</li> <li>- Vercelli rice fields: integrated plan for environmental requalification and sustainable management of rice agroecosystem</li> <li>- Rehabilitation of natural habitats on the Tailles Plateau</li> <li>- Conservation of Euro-siberian steppic woods and Pannonic sand steppes in “Nagykörösi pusztai tölgyesek” pSCI</li> <li>- Acidophilous oak woods with bogs and heaths</li> <li>- Agroecosystems health cards: conservation of soil and vegetal diversity in mountain and bottom valley grazing areas</li> <li>- Habitat restoration &amp; development for Scarce and Dusky Large Blue in N2K area Vlijmens Ven, Moerputten and Bossche Broek</li> <li>- Monitoring Soil Biological Activity by using a novel tool: EDAPHOLOG-System - system building and field testing</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

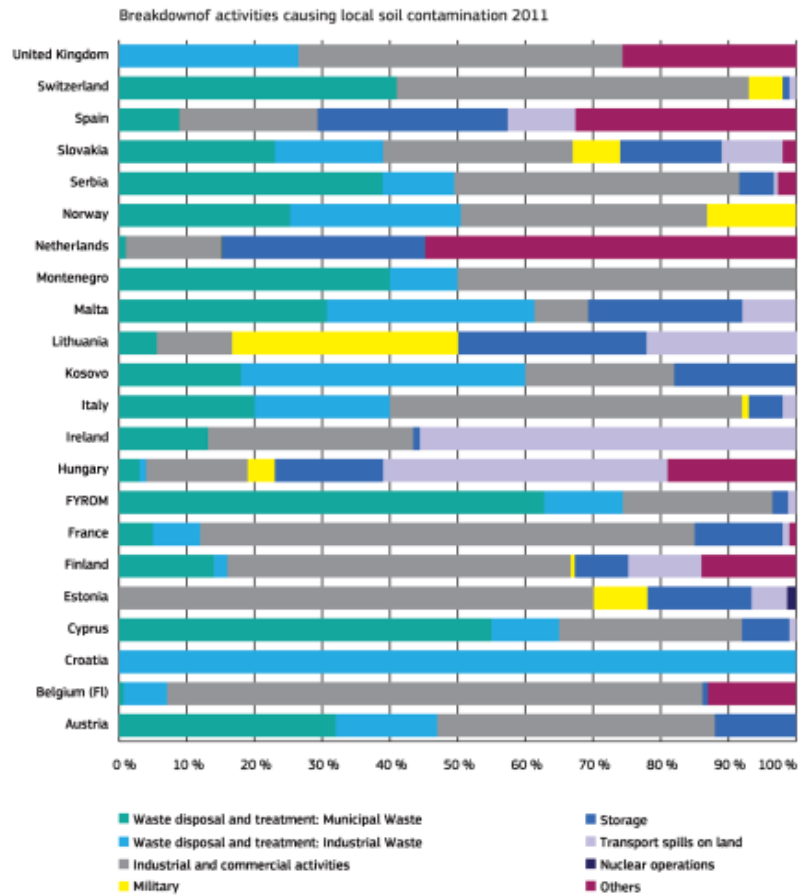
- EU(2014)는 토양에서의 물은 농업토양관리, 홍수, 지하수용수의 제공 등 토양의 생태계서비스 제공의 중요한 역할을 담당하고, 토양의 훼손은 토양의 생태적이고 경제적인 가치 손실에 직접적인 요소임을 인식하고 있으며, 환경에서 토양과 물의 균형, 물과 토양오염, 강변과 습지 복원, 이탄지역과 초지복원 등을 연계한 환경보전 및 복원정책을 지원하고 추진하였다.

<표 3-29> EU LIFE Environment 2014의 물과 토양을 연계한 주요 과제

물과 토양, 12 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ythan Project The Ythan Project - sustainable land management in the Ythan catchment</li> <li>- AgriPoM Odense Pilot River Basin - Agricultural Programme of Measures</li> <li>- Application of integrative modelling and monitoring approaches for river basin management evaluation</li> <li>- Ecohydrologic rehabilitation of recreational reservoirs “Arturówek” in Łódź as a model approach to rehabilitation of urban reservoirs</li> <li>- Living River Liesing - Demonstrative Ecological Reconstruction of a Heavily Modified Waterbody in an Urban Environment</li> <li>- Design of a decision tool for hydromorphological restoration of water bodies in Walloon Region</li> <li>- Local hydro-morphology, habitat and RBMPs: new measures to improve ecological quality in South European rivers and lakes</li> <li>- CAMI Water-bearing characterization with integrated methodologies</li> <li>- Tool for regional - scale assessment of groundwater storage improvement in adaptation to climate change</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

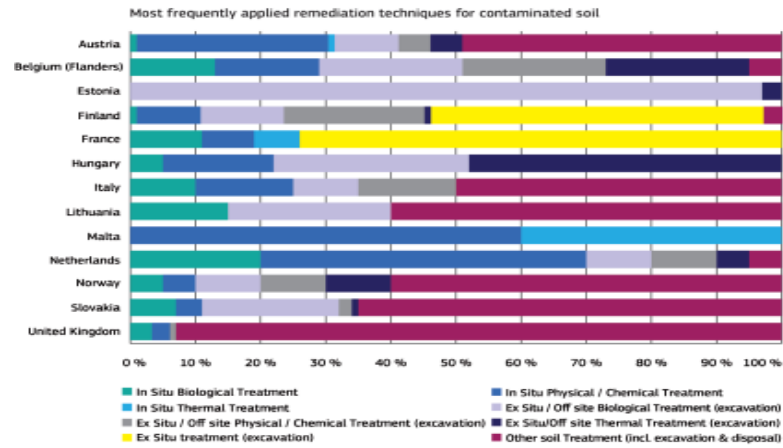
- 유럽 국가들은 오염부지를 조사 및 확인하고, 오염부지에 대한 관리를 단계별로 이행하였다.
  - 오염부지를 확인하고 복원하는 단계는 i) 사전연구 및 부지확인(preliminary study/site identification), ii) 사전 조사(preliminary investigation), iii) 부지조사 (main site investigation), 그리고 iv) 위해성 감소 수단의 이행(implementation of risk reduction measures) · 복원(remediation)이다.
  - 오염이 발생하는 오염원은 에너지생산시설, 유류이용 산업시설, 화학산업, 주무산업, 전기 산업, 섬유, 식량생산, 광산, 군부대 지역 등 다양하며, 이들 오염 부지에 대한 인벤토리가 작성되며, 부지의 공간자료에 의한 지도화를 수행하였다.



자료: van Liedekerke et al. (2014)

<그림 3-37> 유럽 국가들의 오염부지 특성

- 오염부지를 정화하는 수단으로는 오염부지의 이용목적과 정화수단의 적절성 등을 고려하여 선택하였다.
- 부지의 정화수단으로는 오염토양의 생물학적, 물리학적, 화학적 처리방법과 수단이 오염부지 (*in-situ*) 또는 오염부지에서 벗어난 상태(*ex-situ*)에서 적용하였다.
- 가장 일반적으로 사용되는 정화처리 방법은 국가별로 차이가 있으며, 오염토양을 걷어내어 매립시키는 방법이 전체의 30%로 가장 일반적이며, 오염지하의 경우는 부지외의 물리·화학적 처리(*ex-situ* physical and/or chemical treatments)가 가장 일반적으로 전체의 37%에 달한다.



자료: van Liedekerke et al. (2014)

### <그림 3-38> 유럽국가에서의 오염토양 처리 방법

- EU는 유럽 국가의 토양 정보를 축적, 정리, 분류하고, 수요자들에게 제공할 수 있는 유럽 토양자료센터 (ESDAC, European Soil Data Centre)를 2006년 설립하고 유럽의 토양 자료를 제공하고 있다 (Panagos et al., 2012; ESDAC, 2016).
  - ESDAC는 유럽 ‘Environmental Data Centres’ 의 한 부분이며, 토양의 침식(erosion), 답압(compaction), 생물다양성 손실(biodiversity loss) 등을 포함한 정책결정자들에게 자주 사용되는 유럽토양의 효율적이며 신뢰할 수 있는 토양 자료 및 정보를 수집하고 토양 상태를 평가한다.
  - ESDAC는 세계 57개 국가의 토양 자료에 접근하여 자료를 축적하고 있으며, 주요 자료 사용 국가는 Germany (15%), UK (13%), Spain (9%), Italy (8%), France (8%) and the Netherlands (7%)이다.
    - EU 외의 국가에서 접근 및 사용: 전체 접근자의 12%는 EU 외 국가에서 접근
  - ESDAC 자료는 EU 정책결정자들이 쉽고 용이하게 접근하고 사용할 수 있는 자료 (온라인 상태 유지)이며, Copyright 제한 없이 토양의 pH, 침식 등 토양질에 관한 6,000개 지도를 제공하고 있다.
    - 이 자료의 주 사용자는 과학연구자(68%)로 탄소 주기, 토지이용, 기후변화, 생물다양성, 서식처 관리 등의 컴퓨터 모델 개발 등에 사용된다.
    - 일반 대중이 이 자료에 접근할 수 있으며, 토양 및 환경 문제에 관한 대중의 인식 제고에 활용이 가능하다.
  - 한편 EU는 토양의 오염, 침식, 비옥도와 탄소의 저장, 그리고 토양의 생태계서비스에 중요

한 역할을 제공하고 있는 토양생물다양성 등에 대한 현황 자료의 부족을 채워가기 위한 모니터링 운영체계를 구축하고 모니터링을 지원하고 있다.

<표 3-30> EU LIFE Environment 2014의 토양 현황자료의 모니터링 체계 구축 및 운영을 위한 주요 과제

모니터링, 11 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- a soil information system for the Maltese Islands</li> <li>- Development of the Croatian soil monitoring programme with a pilot project</li> <li>- Soil Sustainability (So.S) Soil Sustainable Management in a Mediterranean River basin based on the European Soil Thematic Strategy</li> <li>- Multifunctional Soil Conservation and Land Management through the Development of a Web Based Spatial Decision Supporting System</li> <li>- Monitoring for soil protection</li> <li>- Optimisation of nitrogen management for groundwater quality improvement and conservation</li> <li>- Strategies to improve and protect soil quality from the disposal of olive mills' wastes in the Mediterranean region</li> <li>- Elaboration of novel metagenomic method for environmental monitoring</li> <li>- Monitoring Soil Biological Activity by using a novel tool: EDAPHOLOG-System - system building and field testing</li> <li>- Een geïntegreerd bodembeheer om MilieuEffecten TE Reduceren (Sustainable and integrated soil management to reduce environmental effects)</li> <li>- Innovative System for the Biochemical Restoration and Monitoring of Degraded Soils</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

- 한편 최근 EC 국가들은 물의 보전, 오염방지, 폐기물관리 등을 통해 다양한 토양질의 위협요인(질소, 농약, 중금속 등)으로부터 토양의 질을 보호하고 있다.
  - 대부분의 EU 국가의 법과 제도에서 토양생태계서비스를 보전하기 위한 토양생물다양성의 모니터링은 의무사항은 아니나 최근 독일은 「토양보전법」에 토양생물다양성을 보전하기 위해 선택한 몇 개의 화학물질에 대해 토양오염기준(trigger value)과 더불어 토양의 생태학적인 구분과 평가를 정의하고, 이에 대해 실행하고 있다.
  - 유럽연합(EU)은 중금속을 포함한 화학물질에 의한 토양오염방지 정책과 더불어 토양생태계의 보전과 지속가능한 이용을 통해 건강한 토양생태계를 보전하고 토양과 지하수의 건강성을 유지하는 정책을 추진 있다.

<표 3-31> EU LIFE Environment 2014의 토양 오염부지 확인 및 복원을 위한 주요 과제

부지 오염, 23 프로젝트	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Demonstration of the use of Monitored Natural Attenuation (MNA) as a Remediation Technology</li> <li>- Project to demonstrate the feasibility of compost bioremediation technology for the reclamation and sustainable urban management of brownfields</li> <li>- Biomass, remediation, re-generation: Re-using brownfields sites for renewable energy crops</li> <li>- Remediation of degraded land in the region of Lignite Mine Konin by cultivation of industrial hemp</li> <li>- Phyles Pilot phytoremediation system for the clean up of lead-polluted soils</li> <li>- Prevention of surface water pollution by mining activities</li> <li>- Treating Waste for Restoring Land Sustainability</li> <li>- Using ISCO with perozone for the remediation of a cocktail of organic contaminants at an EX-rated industrial site in operation</li> <li>- New approach on soil remediation by combination of biological and chemical oxidation processes</li> <li>- Rehabilitation of a heavy metal contaminated riverbed by phytoextraction technique</li> <li>- Integrated monitoring system for the global evaluation of disposal activities in an industrial waste land fill</li> <li>- Landfill Monitoring for Life UK and Italy</li> <li>- A pilot experiment of pollutant migration monitoring in a waste-disposal site using crossborehole electrical resistivity tomography and integrated methodologies</li> <li>- Capillary barrier for landfill Construction of a capillary barrier for the surface sealing system of a landfill</li> <li>- Bioman Bioabsorption of Metals from Abandoned mine sites</li> <li>- Ecotechnology for environmental restoration of limestone quarries</li> <li>- Post-mined polluted landscapes reclamation by means of valorization of different residues</li> <li>- Project for the comprehensive restoration of the endorheic basin of Los Tollos (El Cuervo and Jerez de la Frontera, Sevilla and Cadiz respectively)</li> <li>- Laois The Treatment of Landfill Leachate Using Peat</li> <li>- New low-cost procedure for sanitary landfill leachates treatment. Welkenraedt</li> <li>- Filtering of Asbestos fibres in Leachate from hazardous waste Landfills</li> <li>- The sustainable rehabilitation of the landfill site</li> <li>- New Life Environmental recovery of degraded soils and desertified by a new treatment technology for land reconstruction</li> <li>- Innovative and Demonstrative Arsenic Remediation Technologies for Soils</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

- EU 국가들은 토양의 건강성을 유지하기 위한 통합적인 방법으로 EC에서 마련한 ‘토양의 생물다양성을 보전하기 위한 토양생물다양성 지침’ 을 정책에 반영하고 있다.

<표 3-32> EU의 토양의 기능과 생태계서비스에 관련된 제도

정책 · 프로그램	내용	토양의 질 저하 관련 정책 · 프로그램	토양생물다양성에 미치는 영향
EU Forest Action Plan	장기경쟁력 향상, 환경 개선 및 보호, 삶의 질에 기여, 조절 및 협동	포기 농지, 사막화, 산불, 토양 침식, 토양생물 다양성 감소, 비옥도 및 유기물 함량과 관련된 위해	초원에 비해 산림에서 큰 영향을 미침 (SoCo 2009)
Water Framework Directive	수자원의 잘못된 관리를 줄이고 오염 감소, 지속가능한 물이용, 해양 환경 보호, 해양 생태계 개선 및 가뭄과 홍수의 영향 완화를 위한 우선순위를 위한 우선순위	물과 토양 오염, 토양 침식, 토양 다짐, 토양생물 다양성 감소, 비옥도 및 유기물 함량과 관련된 위해	농지로부터의 오염 확산을 막기 위한 EU회원국의 다양한 계획 실행
European Climate Change Programme (ECCP)- Programmes I and II	ECCP 토양관리와 GHG 배출 감소를 위한 논의	유기물 함량의 감소	토양구조와 토양 유기물 양과 분포
Nitrates Directive	무기물 비료의 저장과 응용 및 보관으로부터 유럽 공동체 수자원의 질산염 오염 방지 목적	물과 토양 오염	분뇨저장은 무기물 비료 사용 수준으로 할 것
Sewage Sludge Directive	농지의 하수 폐기물 이용 규제, 토양, 식물, 동물과 사람에게 해로운 영향 방지	토양과 물의 오염, 생물 다양성, 비옥도 및 유기물 함량 감소	유기물, 영양분의 흡수, 토양 오염 물질 부하 증가 · 잠재 위해 수준 증가
Waste framework Directive (2006/12/EC)	인류 건강을 위협하지 않고 환경에 위해하지 않은 폐기물 회수 또는 폐기	토지와 물의 오염	-
Landfill Directive	매립지 환경에 미치는 부정적인 영향 방지 및 감소 목적	토지와 물의 오염	-
Regulation on organic production and labelling of organic products	유기 농업의 지속적인 발전을 위한 새로운 코스 설정을 위한 법률체계, 지속가능한 재배 시스템과 고품질의 다양한 제품 생산 목적	토양 침식, 토양 다짐, 토양생물다양성, 비옥도 및 유기물 함량 감소와 관련된 위해	탄소 양 향상, 토양 교란 감소를 통한 토양 생물다양성에 긍정적 영향, 그러나 상호보완적 관계로 수확 감소 또는 질병 증가 가능

자료: Turbé et al. (2010).

<표 3-33> EU LIFE Environment 2014의 토양을 보전하기 위한 주요 부문별 과제

부지 점용 및 차폐(Land take & Sealing), 21 프로젝트
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sustainable urban development in “PLATAFORMA CENTRAL IBERUM”</li> <li>- A demonstration model which integrates environmental considerations in sustainable land use planning and management through the use of ecological networks.</li> <li>- A proposal for sustainable territorial planning</li> <li>- Demonstration project on land use and environmental management of the physical planning in Gallecs as a biological and stable connector in the fringe space of Barcelona metropolitan area</li> <li>- Project to demonstrate the feasibility of compost bioremediation technology for the reclamation and sustainable urban management of brownfields</li> <li>- Treating Waste for Restoring Land Sustainability</li> <li>- Biomass, remediation, re-generation: Re-using brownfields sites for renewable energy crops.</li> <li>- Maintaining quality urban environments for river corridors users and stakeholders</li> <li>- Promoting the Protection of Natura and Biodiversity in Urban Areas: Award European Capital of Nature and Biodiversity</li> <li>- Green Areas Inner-city Agreement “GAIA” - Development of an urban green infrastructure in the Chanteloup loop</li> <li>- Quick urban forestation</li> <li>- Sustainable Urban Planning Networks for green spaces</li> <li>- Sustainable Urban Water Management Plans, promoting SUDS and considering Climate Change, in the Province of Valencia</li> <li>- Landscapes Climate-proofing Social Housing Landscapes</li> <li>- Extensive roof greening</li> <li>- Conservation and restoration of calcareous fens in Friuli</li> <li>- Green tools for urban climate adaptation</li> <li>- Green roofs against climate change. To establish a UK green roof code to support climate change mitigation and adaptation.</li> <li>- Constructing two demonstration green roofs to illustrate the potential of meeting environmental and energy targets</li> <li>- Multifunctional Soil Conservation and Land Management through the Development of a Web Based Spatial Decision Supporting System</li> </ul>

자료: LIFE environment (2014)

③ 지하수 현황 및 정책

- EU는 유역관리(River Basin Management)와 홍수위험관리(Flood Risk management), 물 부족과 가뭄(water scarcity and droughts), 식수(Drinking water), 해수욕장(bathing water), 배출과 물의 재이용(emissions and water reuse), 지구적 변화에 따른 물과 환경자원 관리의 적응 정책(adapting the management of water and environmental resources in response to global change)을 주요 수자원 정책으로 한다 (EC, 2017).
- 이 중 지하수관련 정책은 유역관리로서의 지하수 수량/수질 관리, 물 부족과 가뭄 대응을 위한 지하수 수량관리, 양질의 음용수 확보를 위한 지하수 관리, 도시하수, 산업폐수, 농

업활동 및 질산염 배출 등으로부터 지하수 수질 관리, 기후변화 대응과 적응방안으로서 수자원과 생태계의 관리의 일환으로써의 지하수 관리 등이다.

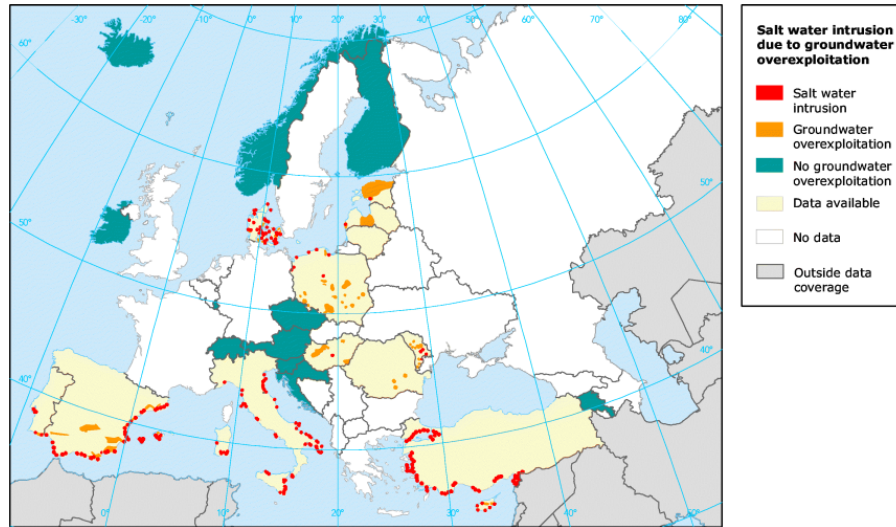
## ㉔ 지하수 환경정책 관련 이슈

### ■ 지하수위 저하와 지하수의존생태계의 변화

- 유럽에 겪는 지하수 관련 문제는 새로운 농경생활 증가와 사회경제적 발전으로 인해 지난 30~40년간 급속한 지하수 양수의 증가가 지하수 함량과 재충전에 영향을 주게 되면서 수량 부족, 특히 지하수 의존 습지의 감소와 지하수 수질 악화 등이다.

### ■ 지하수 과잉 양수로 인한 염수 침투(salt-water intrusion) (EEA, 2008.2.18.)

- 유럽의 많은 국가가 해안을 따라 밀집되어 있어, 인구 밀도와 물수요가 해안을 따라 높으며, 과도한 지하수 양수로 인해, 대수층으로 염침투 문제를 겪고 있다.
  - 이탈리아, 스페인, 터키의 지중해 연안을 따라 관광지의 숙박업소의 과잉 양수의 영향으로 염분 침투가 넓게 분포한다.
  - 몰타(Malta) 지역의 대부분의 지하수는 염분 침투로 인해, 가정용이나 관개용으로 사용이 불가능한 상황에 이르렀다.
- 관개용수는 농업 분야에서 지하수 과잉 양수의 주요 원인이며, 해수 침입 등의 2차적인 문제가 발생할 수 있다.
  - 동부 펠로폰네소스(Peloponnesus)의 그리스 Argolid 평원은 400m 깊이에서도 해수 침입으로 오염된 것이 확인되었다.
  - 이탈리아의 밀라노 대수층 지역의 포강(Po river)의 과도한 개발로 인해 지난 80년간 25m(최대 40m)의 지하수가 감소했다 (Blue Plan, 2005; EEA에서 재인용).



자료: EEA (2008.2.18.)

<그림 3-39> 유럽 국가의 지하수 과잉양수와 해수침투(2003년)

### ■ 용수 공급의 부족

- 유럽지역은 수자원과 인구분포가 불규칙적이기 때문에, 국가별 수질스트레스가 상이하다.
  - 용수 공급 부족 문제는 물수요가 이용가능량을 초과할 때 발생하며, 강수량이 적고 인구 밀도가 높은 지역이나 농업 및 산업활동이 집중된 지역에서 빈번히 발생한다.

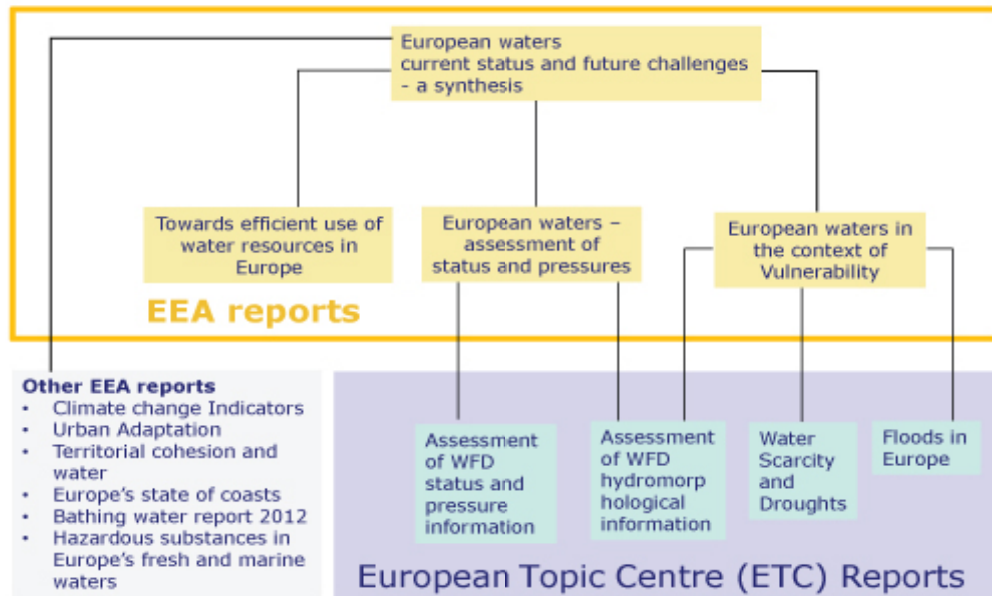
### ■ 지하수 수질 관리(주로 비점오염원 관리)를 위한 제도 마련

- EU는 지하수 수질저하 방지와 좋은 수질상태 유지라는 큰 목표를 설정하여, 그 목표에 도달하기 위한 수질관리 목표를 설정하고, 이의 도달을 위한 대책(주로 비점오염원에 의한 오염방지)들을 제시하여, 각 회원국들이 세부대책을 수립하여 시행하도록 하였다.

### ㉠ 지하수 보전 정책

- EU는 지하수 보전과 관련된 정책은 주로 수질보호에 해당한다. 물기본지침에서 지속가능한 물이용, 즉 수량에 대한 규제를 포함하며, 보완적 성격의 지하수지침(GWDD) 이하 관련 지침들은 지하수의 수질저하 방지 또는 수질상태 유지라는 큰 목표를 설정하고, 그 목표에 도달하기 위한 시간표와 포괄적인 대책들을 제시하고 있다.

- 유럽환경청(EEA, European Environment Agency)은 2012년 내년 유럽의 수역 및 향후 과제를 평가하기 위한 일련의 보고서를 제출해왔고, 유럽은 물기본지침의 이행에 대한 검토와, 물 부족 및 가뭄 정책에 대한 검토, 기후변화 적응, 물관련 취약성 관련 정책을 검토해왔다 (EEA, 2017.3.26.).



자료: EEA (2017.3.26.)

<그림 3-40> 2012년 EU국가들의 "물 평정"과 관련 자료 축적(보고서 작성)의 기본 구조

- EU는 수생태계가 제공하는 주요 서비스로부터 지속적인 혜택을 얻기 위해서는 수자원의 사용하는 사용하고 관리하는 방식을 개선해야 함을 인식해왔다. 유럽 대륙은 수백만 킬로미터의 강과 호수 등 지표수로 덮여 있으나, 부영양화 등의 환경문제에 직면해왔기 때문에, 수역의 환경 상태(status)를 평가하고 특성을 파악하는데 집중했다.
- 수자원의 주요 정책목표는 1) 이용가능한 수자원의 장기적인 보호를 통해, 지속가능한 용수 공급을 촉진하고, 지속가능한 수자원을 확보하는 것. 2) 2015년까지 양호한 지하수 상태(status)를 달성을 목표로 지하수 양수와 함양사이의 균형을 유지하는 것이다.
- 또한 인간의 욕구와 환경에 이용되는 양질의 수량과 수질을 확보하기 위해서는 농업 정책에도 부합하도록 수자원 정책의 강화를 목표로 하고 있다.
  - EU는 회원국들에게 물기본지침(Water Framework Directive, WFD)을 통해 수자원을 보전하도록 규정하고 있다. 물의 환경비용이 물의 가격에 반영되도록 허용할 것이며, 국가, 지역 및 지방당국은 물 사용의 효율성을 개선하고, 수자원의 이용이 적은 작물로 전환하는

등 수자원의 질을 보호하는데 필요한 농업 관행의 변화를 조장하도록 한다. 또한 몇몇 국가에서는 물의 누수를 감소시키기 위한 목표를 설정하고 이행하고 있다.

- WFD에서 제시하는 환경 목표를 달성하면서, 사용자가 수자원을 효율적으로 사용할 수 있도록 적절한 인센티브를 제공하는 등 물가 정책을 추진하고 있다. 산업용, 가정용, 농업용으로 분리된 상이한 용수 사용은 물공급 서비스 비용의 회수에 기여하고자 하는 것이다.
- EU는 물기본지침(Water Framework Directive, WFD)을 통해, ① 모든 물(지표수, 지하수 포함)을 통합 관리하고, ② 일정기한까지 물을 양호상태(Good status) 달성하도록 하는 목표관리를 수행하며, ③ 배출기준치와 환경질(수질기준)을 연계하여 접근하고, ④ 공급에 소요된 비용을 회수하는 원칙 즉, 원인자 부담 원칙을 적용하여 물가격을 정상화하고, ⑤ 다양한 이해당사자의 의견을 반영하여 지속적인 수정과 보완을 수립하고, 입법 간소화를 지향하고 있다.
- 유럽연합은 수자원의 통합관리의 일부로서 지하수를 다루고 있음에도, 지질에 따라 상이한 수질의 변화와 특정관리의 필요성에 따라 별도의 지하수 지령(GWDD)을 제정하여 운영하고 있다.

<표 3-34> EU의 지하수 관련 정책 현황

주요 지침	목적	주요내용
<p>물기본지침 (Water Framework Directive)</p>	<p>수자원의 잘못된 관리를 줄이고 오염 감소, 지속가능한 물이용, 해양 환경 보호, 해양 생태계 개선 및 가뭄과 홍수의 영향 완화를 위한 우선 순위</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유럽 내의 모든 물(지하수, 하천, 호수, 하구수, 연안수 등)을 유역관리계획(RBMP)에 의하여 유역수준에서 관리</li> <li>- 회원국들은 자국 내의 개별 유역들을 설정하고 그 안에 있는 수체(water body)를 구분하여, 환경목표를 설정하고, 이를 달성하기 위해 모든 수체들의 상태(status)를 결정함             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 목표: 2015년까지 모든 수체가 좋은 상태(good status)에 도달, 현재 좋은 상태를 보이는 물은 현상유지, 현재의 물 상태가 저하되는 것을 방지</li> </ul> </li> <li>- 회원국들은 각 유역별로 환경목표에 도달하기 위한 대책프로그램(PoMs)을 2009년까지 수립, 2012년까지 착수</li> <li>- 대책프로그램 결과는 2015년까지 EC에 보고하여 검토받고 2015년 이후 매 6년마다 반복</li> </ul>
<p>지하수지침 (Groundwater Directive, 2006/118/EC)</p>	<p>WFD의 보완적 성격(Article 17에 의함)으로, 지하수 수질기준 설정과 지하수에 오염물질의 유입의 예방 및 제한이 목적</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 회원국들은 2008년까지 국가별 또는 유역별, 지하수체별 수질 기준을 만들고, 각 지하수체의 화학적 상태(status)을 판별함</li> <li>- 기존자료, 모니터링 결과(2007-2008년에 얻은 baseline level)를 바탕으로 오염경향(trends) 분석 수행</li> <li>- 2015년까지 환경목표에 도달하기 위해 WFD에 제시된 대책을 통해 오염경향을 역전시키거나, 오염물질이 지하수로 들어가는 것을 방지 및 제한하는 대책을 시행</li> <li>- 2015년까지 EU와 회원국들이 설정한 지하수 수질항목들의 기준값(threshold value, 문턱값)을 바탕으로 좋은 화학적 상태에 도달하도록 함</li> </ul>

<표 3-34의 계속>

주요 지침	목적	주요내용
질산염 지침 (Nitrates Directive, 91/676/EEC)	무기물 비료의 저장과 응용 및 보관 등 농경활동으로 인해 야기되는 유럽전역의 지하수 및 지하수의 질산염 오염 저감과 예방이 목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (민감 지역 지정 및 실행프로그램 적용): 회원국은 질산염 오염으로 영향 혹은 잠재영향이 있는 것으로 알려진 물(지하수 포함) 중 질산염 농도가 50 mg/L 초과되거나 무대책시 초과 우려가 있는 곳을 질산염취약지구(Nitrates Vulnerable Zone, NVZ)으로 지정하는 것을 의무화하고, 실행프로그램(action programmes: AP)를 적용해야 함</li> <li>· 영토 전체에 대하여 AP를 실행한 회원국은 질산염취약지구 설정 면제(예: 독일, 네덜란드, 오스트리아, 핀란드 등)</li> <li>- (질산염 농도 한계목표): 50 mg/L</li> <li>- (대책): 각 지침별 대책은 상이</li> <li>- (NVZ 설정 주기): 4년 주기로 NVZ 검토를 통해 수정하거나 확장</li> </ul>
도시폐수처리지침 (Urban Wastewater Treatment Directive, 91/271/EEC)	도시 폐수와 산업 폐수의 방류로 인해 야기되는 환경 보호를 목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 민감 지역(sensitive area) 지정</li> <li>·담수, 삼각주, 연안지역의 물 중 부영양화된 것</li> <li>·교환율이 낮은 호소. 저수로 유입되는 호수나 지류</li> <li>·질산염 50mg/L 초과한 먹는물 용도의 지표(담)수</li> </ul>
Plant Protection Products Directive (91/414/EEC)	식물보호를 위한 처리물질을 사용한 식물제품의 판매 등 승인을 규제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 식물보호제품을 승인할 때, 인간건강이나 지하수(특히, 음용수로 이용되는 물)에 악영향이 없고, 환경에 무해한 것을 승인함</li> </ul>
Biocides Directive (98/8/EC)	살생제(살충제, 제초제 혹은 제균제 등) 제품의 시중 판매 시 승인을 규제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 살생제 승인 시 지하수와 관련이 있는 것은 식물보호용제 품지침과 동일한 내용임</li> </ul>
Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Directive (96/61/EC)	통합예방규제 지령은 대기, 물, 토양 오염의 예방 혹은 저감을 위한 대책	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (적용대상): 고오염 잠재 산업 부문: 에너지, 금속제조가공, 광물 및 화학 산업, 폐기물관리시설, 식품 생산, 비산업 부문: 축산</li> <li>- (허가제 실시): 기존 및 신규 시설에 대하여 허가제를 통해 토양 및 지하수를 보호, 오염물질 배출제한</li> <li>- 2011년 발효된 산업배출지침(Directive on industrial emissions, 201/75/EU(IED))이 2014년 7월부터 IPPC를 대체</li> </ul>
Landfill Directive (99/31/EC)	매립지 환경에 미치는 부정적인 영향 방지 및 감소 목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 환경영향평가를 기반으로 허가제로 운영</li> <li>- 평가지역의 지하수, 지질 및 수리지질 조건 확인</li> <li>- 부지는 매립 폐기물의 유입 방지와 오염된 물이나 침출수를 집수하거나 처리하기 위해 설계하거나, 지질장벽이나 바닥 라이너 등 적정 기술을 통해 토양 및 지하수 오염을 예방하도록 함</li> </ul>

<표 3-34의 계속>

주요 지침	목적	주요내용
건설제품지침 (Construction Product Directive, 89/106/EC)		- 물이나 토양오염을 유발하거나 거주자 및 주변 사람들의 건강에 위협을 일으키는 건설제품을 규제하는 조항이 포함되어 있음
폐기물관리지침 (Waste framework Directive, 2006/12/EC)	인류 건강을 위협하지 않고 환경에 위해하지 않은 폐기물 회수 또는 폐기	- 폐기물이 환경과 지하수에 위해를 가하지 않도록 회수 혹은 처분하도록 함

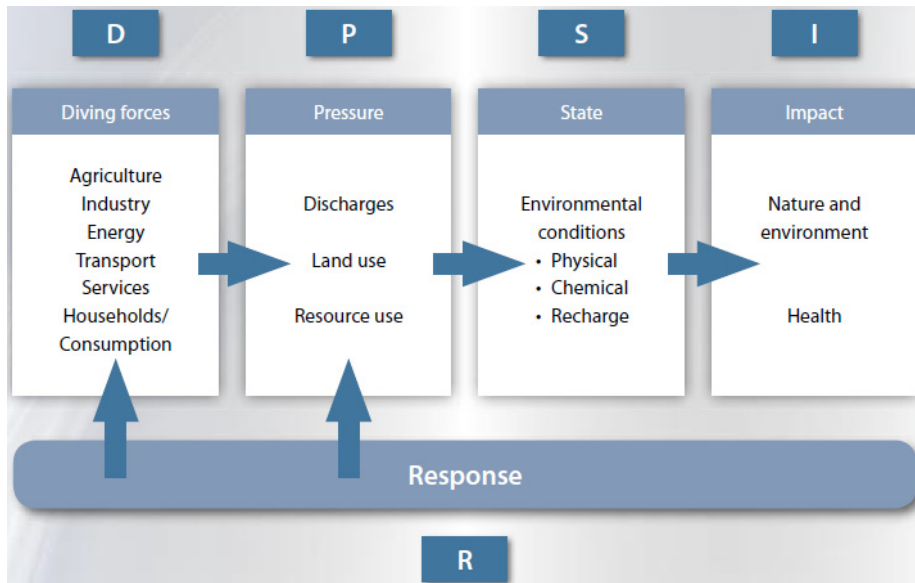
자료: EC(2017: 이수제 외(2015) 재인용)

### ■ 물기본지침(WFD)과 지하수지침(GWDD)에 의한 지하수 양적 및 화학적 좋은 상태 달성

○ WFD의 모든 수역의 조치와 동일하게, 지하수 역시 양적 및 화학적으로 좋은 상태(Good status)를 달성하기 위해 다음과 같이 단계별 정책을 수립하였다.

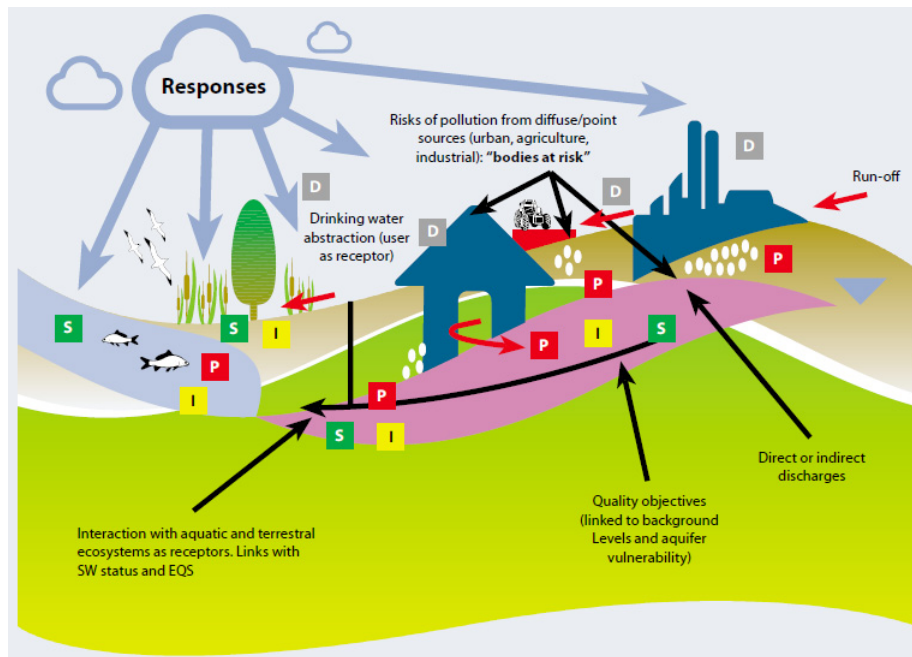
- **단계 1) 지하수체 정의 및 특성화:** 유역단위(River basin districts) 내 지하수체(관리 단위)를 정의하고 특성화하여 유럽집행위원회(EC: European Commission)에 보고해야 한다.

- 특성화 방법: DPSIR(Driver-Pressures-Status-Impacts-Response) (EC, 2008)
- WFD의 환경 목표를 달성하지 못할 위험이 있는 지하수체를 확인하기 위해 지하수 수질에 영향을 주는 인간 활동을 포함한다.
- 이 평가는 지하수 이용을 수생태계 및 육상생태계와 연계함. 대수층의 취약성과 관련되어 있고, 요인으로 작용함. 회원국들은 2004년과 2005년 사이에 대수층을 분류하고, 그 결과를 EC에 제공하여 2007년 3월에 최종 출판했다.
- 수생태계 및 육상생태계와 관련된 지하수에 영향을 미치는 주요 원인(D), 요인(P), 상태(S), 영향(I), 반응(R)을 나타내면 다음 <그림 3-41>과 같으며, R은 EU의 WFD에서 수행하는 주요 프로그램으로 제시될 수 있다 (EC, 2008).



자료: EC (2008)

<그림 3-41> "DPSIR" 개념도



자료: EC (2008)

<그림 3-42> EU의 지하수체 정의 및 특성화 개념도

- **단계 2) 지하수 보호 지역 등록:** 특별히 지표수와 지하수 보호가 요구되거나 물에 직접적으로 의존하는 서식지나 중을 보호가 필요한 지역을 각 유역단위 내에서 보호지역(protected area)으로 등록해야 하며, 음용수 취수 지역과 다음의 지침으로 보호된 지역이 해당된다.
  - the Bathing Water Directive 76/160/EEC,
  - the vulnerable zones under the Nitrates Directive 91/676/EEC
  - the sensitive areas under the Urban Wastewater Directive 91/271/EEC,
  - Natura 2000 sites designated under Directives 92/43/EEC and 79/409/EEC.
- **단계 3) 지하수 모니터링 네트워크 구축:** 대수층 특성화 및 위해성 평가 결과를 토대로 지하수 화학 및 양적 상태를 모니터링하기 위한 네트워크 설계를 해야 한다.
  - 2006년 말까지 운영
- **단계 4) 유역관리계획(RBMP) 구축:** 각 유역마다 다음의 사항을 포함하는 유역관리계획(river basin management plan)을 수립해야 한다.
 

※ RBMP는 2009년에 처음 발간되어, EC 웹사이트에 공개하고 있으며, 검토주기는 6년이며, 개정판은 2015년에 완료했다.

  - 지하수 상태에 대한 인간 활동의 요인 및 영향을 요약
  - 모니터링 결과를 지도 형태로 제시
  - 물 사용에 대한 경제성 분석
  - 관련 보호프로그램 요약
  - 규제 혹은 정화(개선) 조치 사항
- **단계 5) 합리적 비용 부담을 위한 물 가격 설정 요구 :** 2010년도까지 환경과 자원 비용을 고려하여 물서비스에 소요된 비용회수 원칙(principle of recovery of costs)과 오염원인자부담원칙(polluter pays principle)이 적용해야 한다.
- **단계 6) WFD 환경 목표를 달성하기 위한 대책 프로그램 구축 :** 2009년까지 WFD 환경 계획 목표 달성을 위한 프로그램을 구축하고, 2012년까지 운영해야함(Article 11). 또한 대책프로그램은 유역관리계획(RBMP)에 포함시켜야 한다.
 

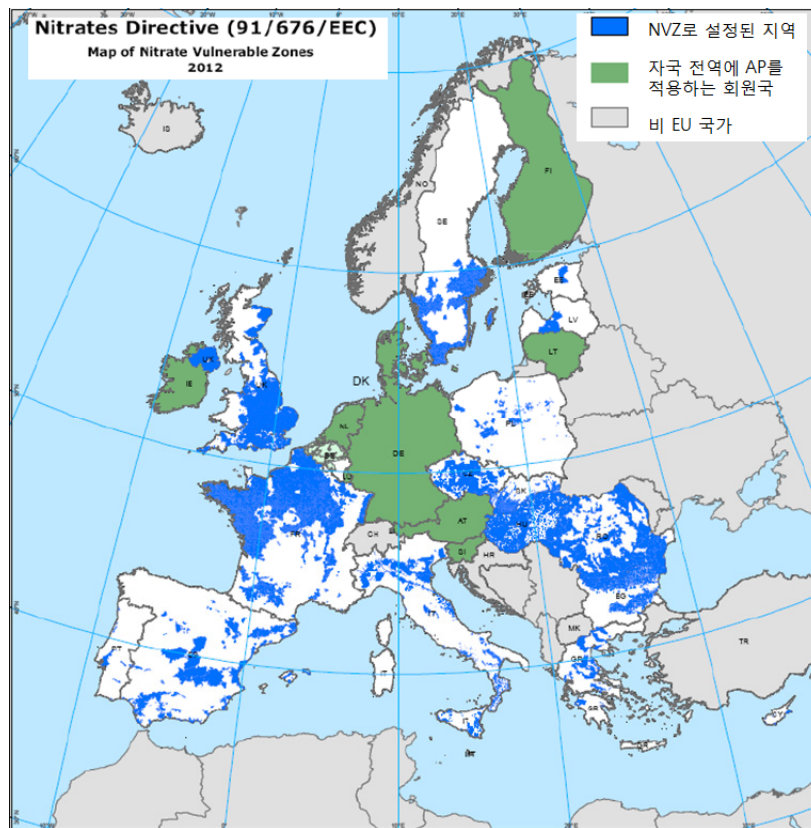
※ 대책프로그램 실행 결과는 2015년까지 EC에 보고하여 검토 받고 2015년부터는 6년 주기로 갱신(과정 반복)

  - 취수 규제
  - 오염 예방 혹은 방지 대책
  - 지하수체의 확장 및 인공함양의 규제(우선 인가 포함, 환경계획목표와 상충되지 않도록 함)

- 오염을 유발하는 점오염원 및 비점오염원 규제
- 지하수에 오염물질의 직접 배출의 금지(제11조 목록 구비)

■ 질산염지침(Nitrates Directive)에 의한 모든 수역의 질산염 관리

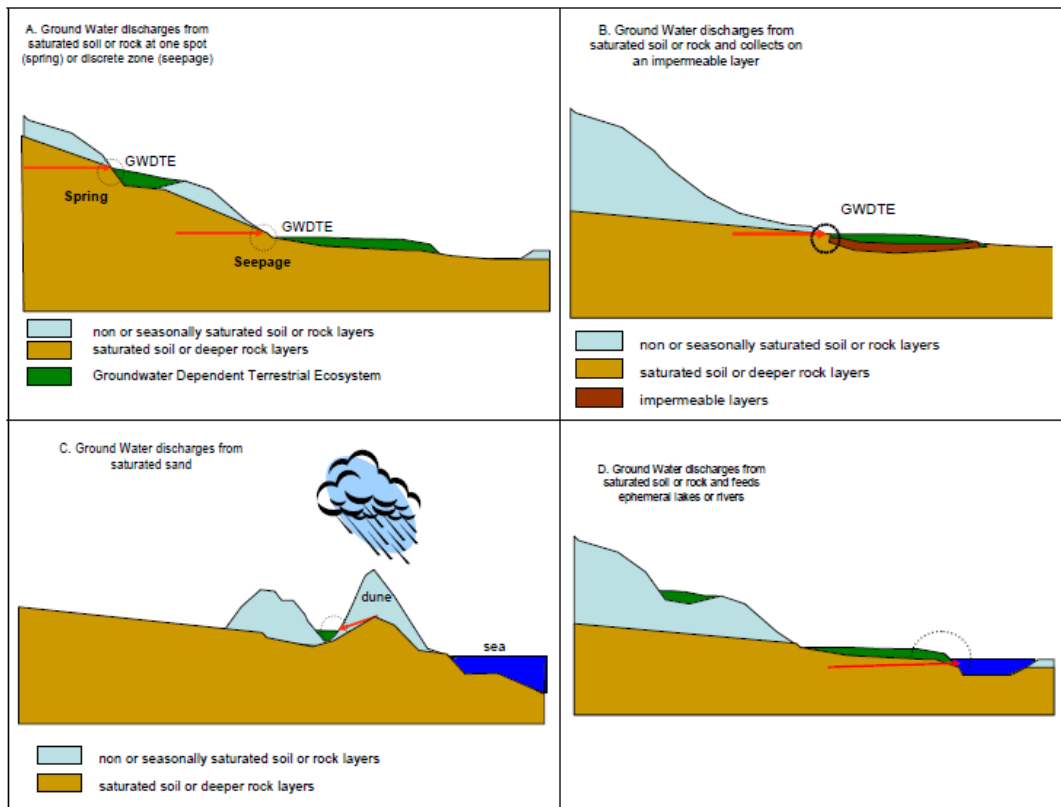
- 좋은 농경활동(good agricultural practice)과 실행계획(action programme)을 통해 농업기원 질산염으로부터 유럽전역의 지표수 및 지하수 수질을 보호하기 위해, 1991년에 제정하였다 (EC, 2016: 이수재 외, 2015에서 재인용).



자료: EU (2013)

<그림 3-43> 2012년 EU국가들의 질산염취약지구 설정현황

- Nitrates Directive가 제안하는 질산염 오염방지과 저감을 위한 대책은, 크게 좋은 농업규정 설정과 실행프로그램 적용 및 평가이다 (EC, 2016: 이수재 외, 2015에서 재인용).
  - 좋은 농업규정(Codes of Good Agricultural Practice, CGAP) 설정을 통해 농업활동에 의해 발생하는 수질오염의 일반적인 조치(고려)사항을 농민들에게 제시함으로써 자발적 참여를 유도하고 있다.
  - 실행프로그램(Action Programmes, AP)은 NVZ에 적용되는 실효적 프로그램으로, 회원국들은 ANNEX 41의 대책들을 바탕으로 자국에 필요한 AP를 만들고, 이를 EC에 보고하여 실행해야 한다. 매 4년마다 평가받고, 필요에 따라 수정하며, 수정내용 역시 EC에 보고하여야 한다.
- EU는 또한 지하수 의존 육상생태계(Groundwater dependent terrestrial ecosystems, GWDTEs)의 지하수체를 4가지로 분류하고, 이에 대한 정책을 수립하였다.



자료: EC (2011)

<그림 3-44> GWDTEs 개념도

## (나) 미국

### ① 배경

- 국토면적이 9,629,091 km<sup>2</sup>이며, 본토와 알래스카, 북아메리카 대륙 남서쪽으로 태평양 한 가운데에 자리한 군도인 하와이로 구성된다.
- 알래스카는 미국에서 가장 넓은 주로, 면적이 1,717,854km<sup>2</sup>이며, 하와이 주 면적은 16,000km<sup>2</sup> 정도이다.
  - 미국의 영토는 러시아와 캐나다 (또는 중국) 다음으로 세계에서 가장 넓은 나라이며, 중국과 비슷한 수준이다.
  - 육지 면적만으로 미국은 러시아, 중국, 캐나다 다음인 4위이며 오스트레일리아보다 약간 넓다.
- 미국의 지형구분은 비교적 단순하여 3가지로 구분된다.
  - 첫째, 태평양 연안의 환태평양 조산대에 속하는 새롭고 험준한 습곡산지로 세계에서 화산활동이 가장 활발한 지역이며,
  - 둘째, 대서양 연안에 가까운 애팔래치아 산맥으로 오랫동안 침식이 진전된 고기조산대에 속하는 산지가 있고,
  - 셋째, 대륙에 펼쳐진 광대한 내륙평야로 대부분의 지역이 미시시피 강 유역에 전개되어 있다. 이들 지형은 모두 남북으로 길게 뻗어 있어 미국 중앙부에서의 동서 횡단면은 찌자형을 이루고 있다.
- 인구는 약 3억4천4백만명(2016년 기준)이며, 인구밀도는 35인/km<sup>2</sup> 이다. 인구의 85%가 인구 50,000명 이상의 도시에 거주한다.

### ② 토양질 현황 및 정책

#### ㉠ 토양질 현황

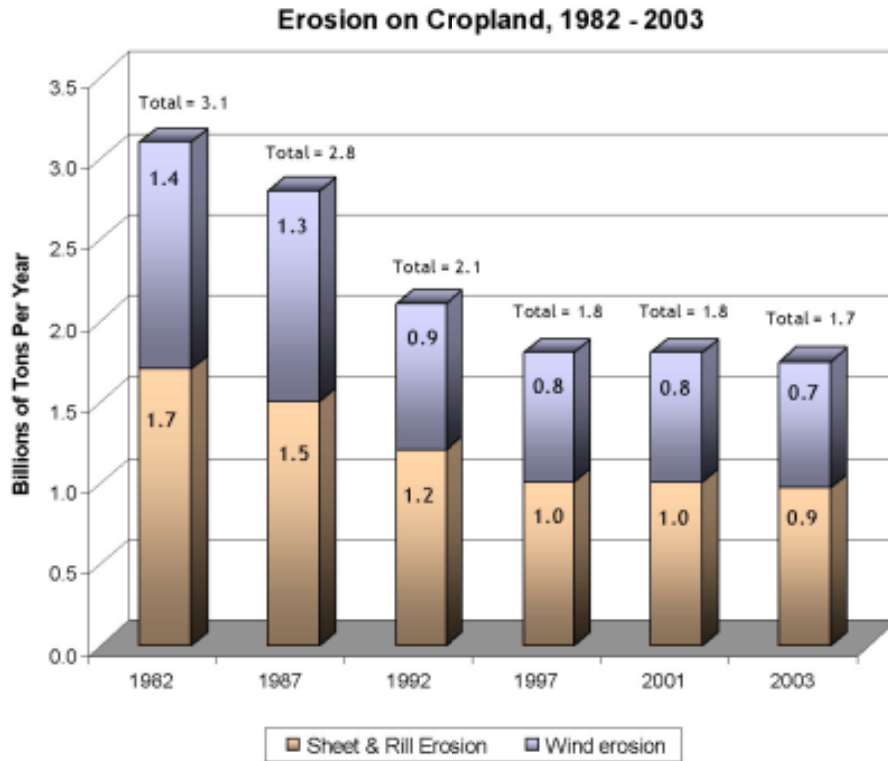
- 뉴욕 주 러브커널 지역에서 1978년 ‘보건상 비상사태 선언’ 으로 유해폐기물 부지에 대중의 관심을 불러 일으켜, 그 후 토양보전정책이 본격적으로 도입되기 시작했다 (Page, 1997).
- Hooker Chemical and Plastic Corp은 1922-1953년 기간 중에 22,000톤(드럼통 약 11만개)의 화학폐기물을 러브커널에 매립 (Love Canal은 원래 운하로 건설되었으나 1940년대에 매립) 하였고, 1950년대 개발자가 이를 구매하고 회사의 화학물질이 폐기된 오염부지위에 ‘Love

Canal'이라는 거주지역을 조성했다.

- 1836년 미국 정부가 나이가가라 폭포 부근에 운하와 발전소를 세우는 계획을 세웠으나 사장되었다가 1892년에 윌리엄 러브(William Love)가 부를 증진시키기 위해 계획을 실행 하였으나, 이후 경기침체 등으로 러브(Love)회사는 도산하고 사업수행이 중단되었으며, 나이가가라 강으로부터 100야드 떨어진 곳에 길이 1마일 가량의 운하 일부만 남게 되었다.
- 1940년대 이후 나이가가라 폭포 부근의 도시는 팽창하였고, 복개된 운하와 그 인근에 학교 와 주택이 들어섰다.
- 1970년대 중반까지 각 언론매체들이 건강 이상에 관련된 이 지역 주민들의 불만을 보도하 였으며, 주민 건강에 관한 연구 결과 이 지역의 오염물질에 의해 인간세포의 기형, 발암확 률을 증가, birth defects, 유산율 증가 등이 밝혀졌다.
- 복개된 운하에 가장 인접한 지역 주민에게서 '73 ~ '78년간 출생한 16명의 어린이 중 9명 이 정신박약, 심장 및 신장질환, 간질증세 등 심각한 선천적 기형을 갖고 있음이 확인되 었고 이 지역 부인들의 유산율이 정상인의 4배임이 밝혀졌다.
- 1978년 8월, 정부(당시 대통령, Jimmy Carter)는 이 지역이 안전하지 않은 국가재난지역 (National Disaster Area)지역으로 공식적으로 선포하고 이 지역의 1004가구의 주민들을 대 피하게 하며, \$3천만불을 들여서 이 지역의 집과 오염지역을 사들였다. 이러한 조치는 오염 지역의 문제와 환경 복원에 관한 국민들의 인식을 극적으로 증대시킨 사건이다.
- 1994년 6월 Hooker Chemical and Plastic Corp의 승계회사인 Occidental Chemical Co.는 9천 8백만불을 이 지역의 정화기금으로 뉴욕주에 지불하는 것을 동의하고 (14년간의 법정 소송 이 끝남), 1995년 회사는 US EPA에 1억2천9백만불을 이 지역의 문제해결 비용으로 지불하 는 것에 동의했다.
- 1988년 6년간에 걸친 연구(연구비 1600만불) 결과, 이 지역의 복원 이후 2/3가량은 주거지 역으로 재이용될 수 있으며, 그 외 지역은 산업 및 상업지역으로 이용하게 되었다.
- 그 외 Valley of Drums in Bullitt County (켄터키주), Time Beach (미조리 주) 등의 오염부 지로 인해 1970년대 말 토양오염에 의한 사회적인 문제가 고조되었다.
- 1975년 켄터키주의 Drum 계곡(약 13 에이커)에 유독한 산업폐기물로 채워진 17,000 드럼이 방치되어 이들 폐기물 드럼에서 140종 이상의 중금속, 방향성수산화탄소물(Aromatic hydrocarbons), PCB등을 포함한 화학물질이 유출되고, 이들 물질이 인근 Wilson Creek으로 유입되어 하천생태계를 파괴 있는 것이 조사되었으며, 이 지역은 이후 수퍼펀드 부지로 분 류되어 1992년까지 정화를 수행했다 (EPA, 1992).
- 미조리 주의 Time Beach 지역은 dioxine이 포함된 기름(oil)을 지방 도로를 깔았으며, 이 오

염물질은 연차적으로 이 지역의 토양과 지하수를 오염시키고 있었다. 이에 1983년 연방정부는 1983년 3,350만불을 투자하여 이 지역의 주민들을 재배치하고, 1990년까지 5,250만불을 이 지역의 정화에 투자하였고, 1990년 6월20일, 이 지역의 오염에 책임이 있는 Synthex Agribusiness는 이 지역의 복원에 추가적으로 9천만불-1억1천만불이 소요될 것으로 평가하고, dioxine으로 오염된 이 지역의 오염부지 정화는 1997년 완료되었다 (Page, 1997).

- 1983년 미국 의회의 Office of Technology Assessment(1983)에 의하면, 당시 미국의 경우 600,000 개소의 오염가능 부지가 있을 것으로 추정했다.
- 2002년 43,000개 이상의 부지가 오염되었거나 오염가능성이 있으며, 2014년 2월 현재 National Priority Lists(NPL)에 수록되어 있는 오염부지는 1,322개소이며, 53개소가 잠재적 등재 부지에 해당한다.
  - 2002년 현재 미국에서 CERCLIS에 등재된 Superfund 부지는 총 10,879개소이며, 이중에서 NPL 부지는 1,224개소 Non-NPL부지는 9,655 개소이며, 이중에서 심화된 토양오염으로 인하여 선정된 NPL 부지는 994개소이고, Non-NPL부지는 1,093개소이다 (박용하 등, 2002).
    - 토양오염으로 인한 Superfund부지가 전체 NPL 부지의 경우 81%에 해당하며, 토양오염으로 인한 Non-NPL부지는 전체 Non-NPL부지의 약 11%에 해당한다.
  - 2014년 2월 현재 375개소의 NPL 부지가 정화되어 NPL에서 삭제되었다.
- 미국 경작지의 27%(48백만 ha)가 잠재적 고침식 위험지로 구분되고 있으며, 농경지의 약 10%가 토양 침식 속도 1년에 25톤 이상인 심함 수준이다.
  - 미국 환경청(EPA, 1990)의 보고서에 의하면, 미사 침전물에 의해 국가 수계의 수질 악화에 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 농업이 수질을 악화하고 있다.



자료: USDA/NRCS (2006)

<그림 3-45> 미국 농경지에서의 침식량 변화 추이

- 미국은 20세기 초부터 토양침식이 국가의 위협이라는 인식하여 국가 차원에서 토양침식으로부터 토양을 보전하기 위한 정책을 수행해왔다 (정영상, 2015).
  - Laflan & Moldenhauer(2003)은 “미국에서 토양 침식이 심각한 문제이며, 미국에 대한 위협이라는 인식이 없었다면, 보전에 대한 연구도 없었을 것이다” 라고 단언하고 있으며, 일찍이 미국의 선구 농민 Jefferson이 1913년에 토양 침식의 위험성을 경고했으며, Duley와 Miller는 1923년 미주리 농업시험장 보고서를 통해서 토양 침식의 위험성을 보여주고 있다.
  - Bennette와 Chapline(1928)의 ‘토양침식-국가의 위협’은 공공과 정책 결정자들의 관심을 끌게 되었으며, 1929년 의회가 토양 침식의 원인을 구명하고, 토양을 보호하며, 토양 침식으로부터 보전할 수 있는 방법을 찾기 위한 연구비를 승인했다.
  - 1939년 이에 대한 USDA 지침 자료가 만들어지게 되는 등, 국가차원에서 토양침식에 대한 정책이 추진되었다.

## ㉔ 추진정책

- 토양과 지하수의 보전정책은 크게 토양의 질을 보전하기 위한 부문과 토양오염 부문으로 구분하여 부서별로 접근하고 있다.
  - 환경청(EPA, Environment Protection Agency)의 정책은 토양오염방지 및 정화, 폐기물관리, 오염물질로부터의 부지관리 및 정화부지의 관리에 초점을 두고 접근하며,
  - 농무부(USDA, US Department Agriculture)는 토양의 침식, 산성화, 염화, 유기물질 보전 등 토양의 질을 보전하기 위한 법과 정책 및 이행 등 토양자원의 보전 및 서비스 부문에서 수행하고 있다.

## ■ 토양오염

- 유류나 유해화학물질이 환경매체로 유출된 다양한 오염부지들이나 이들 화학물질의 유출을 조사하고 정화하기 위해 1980년에 CERCLA(종합환경대응보상책임법, Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act)을 제정했다.
  - CERCLA(‘수퍼펀드 법’으로 칭함)는 미국 연방정부에서 Love Canal이나 Times Beach와 같은 1970년대 독성 유해폐기물 부지문제를 해결하기 위해 제정되었으며, 이 법은 EPA로 하여금 오염부지를 정화할 수 있는 권한을 부여하였으며 오염책임자들로 하여금 정화를 실시하도록 하거나 EPA가 정화한 부지에 대해 오염책임자에게 배상액을 요구했다.
  - 국민의 보건과 환경보호를 위해 i) 정보수집과 보고체계 마련, ii) 연방정부의 권한 명시, iii) 오염부지의 정화비용을 위한 기금 마련, iv) 오염원인자에 대한 소급·연대·무과실 책임부과 등의 내용을 수록하고 있다.
  - 환경보호청(EPA)에서는 이들 부지에 대해 조사 및 정화 행위들을 시행하거나 감독했다. 또한 운영 중이거나 폐기된 폐기물부지들, 연방정부 시설이나 소유지, 지상 또는 지하저장탱크들이 누출된 지역들에 대해 정화를 수행해오고 있다.
- CERCLA는 수퍼펀드 수정 및 재수권법 SARA(Superfund Amendments and Reauthorization Act)로 1986년에 개정되었고, 2002년에 소규모기업 면책 및 브라운필드 재생법으로 개정했다.
  - SARA에는 다음 내용을 포함하고 있다.
    - i) 정화기준을 엄격하게 적용하여 수퍼펀드 부지의 정화비용과 대상범위 증대, ii) 다른 환경법률 및 주정부 기준·규정 고려

- iii) 수퍼펀드 프로그램에 연방시설을 포함
  - iv) 새로운 집행권한과 합의방법 부여
  - v) 주정부의 참여 확대
  - vi) 오염으로 인한 인간건강 문제에 관심 증대
  - vii) 정화방법 결정시 주민참여 증대, viii) 신탁기금의 조성
- 수퍼펀드(Superfund), 브라운필드, RCRA(Resource Conservation and Recovery Act) Corrective Action, 지하저장탱크 오염 부지에 대한 수퍼펀드의 정화프로그램은 우선 부지들을 평가해서 국가우선목록(National Priorities List, NPL)에 등재한 후 적절한 정화계획을 수립 및 시행하는 것이다.
  - 국가비상계획(NCP)의 제·개정을 통해 환경부, 주정부, 잠재적 오염책임자가 긴급제거조치와 장기적인 정화 조치를 실시할 때 준수하여야 할 세부절차와 내용을 규정했다.
  - 현재 운영 중인 유해폐기물 관련 시설의 관리를 위해 RCRA법을 1976년에 제정하고 운용하고 있다.
  - 2010년 이후 토양과 지하수보전정책의 주요 이슈는 오염부지 정화 (수퍼펀드, 브라운필드), 지하저장탱크 (UST), 지하천연가스 발굴, 매립지 관리, GreenScape(비용 효과적이고 친환경적인 조정), 기후변화(해안지역의 영향 및 적응, 농업 및 식량 생산)이다.
    - 수퍼펀드 프로그램의 다양한 방법론을 개발하여 수퍼펀드 프로그램의 현 목표를 재평가하고, 장기적인 정화조치를 위해 한정된 수퍼펀드의 효율적 배분방법론 개발 및 잠재 오염책임자가 오염부지의 정화를 능동적으로 수행할 수 있도록 경제적 인센티브를 제공하는 방법을 개발해왔다.
    - 미국 오염부지에 대한 복원 비용은 2033년까지 최대 2,530억달러 규모로 예상되고 있으며 소규모 프로젝트가 다수가 있다.

## ■ 토양의 침식 등 토양자원의 보전 및 서비스 정책

- 토양의 침식을 방지하기 위한 미국의 토양보전법(Soil Conservation Act)은 1935년에 제정했다.
  - 토양침식은 지표면에서 발생하며, 침식은 토양에 존재하는 유기물, 미생물 등의 기능을 상실케하여 토양의 작물생산기능을 손실케 하는 개념에서 침식방지 등을 위한 토양보전법(Soil Conservation Act)은 농무부(US Department of Agriculture, USDA)의 자연자원보전국

(Natural Resources Conservation Services, NRCS: 이전명칭은 Soil Conservation Services 임), 농가지원청(Farm Service Agency, FSA)에서 시행하였다.

- 2011년 USDA는 토양 및 수자원 보전법 (Soil and Water Resources Conservation Act, RCA) Appraisal 2011을 발표했다.
- 자발 체계에서 농민들이 토양 보전 프로그램을 준수하는 체제로 변천했다.
  - 이러한 제도의 변천은 많은 교차 준수 인센티브를 환경 관리와 함께 농업 지원 프로그램에의 참여를 연계한 1985년 식량 안전보장법(Food Security Act, FCA)으로부터 시작했다.
- 1985년 이후 토양보전법(Soil Conservation Act)의 농경지 보전프로그램인 보전휴경사업 (Conservation Reserve Program) 및 보전안전사업(Conservation Security Program)을 시행했다.
  - CRP(보전휴경사업): 침식가능성이 높거나 환경적으로 민감한 경작지를 농가에서 자발적으로 10~15년 휴경시킬 경우, 정부가 매년 휴경보상금 및 환경보전 시설비 일부를 보조해주는 프로그램이다.
  - CSP(보전안전사업): CRP 제도로 인해 휴경 된 농지의 계약 만료 이후 환경보전을 위해 환경보전 비용의 일부를 직접 지불하는 것이다.
- 1985년 이후 습지를 훼손케 하거나 초지를 훼손하는 경작방법 등에 대해서는 토양의 침식 방지를 목적으로 정부의 강력한 정책이 추진되었다.
  - FCA의 “초지파괴경작자(sodbuster) 프로그램“은 승인된 보전 대책 없이 침식 우려지를 경작지로 전환하는 농장 프로그램을 거부할 수 있다.
  - “보전준수(conservation compliance)” 와 “습지경작자(swampbuster)” 프로그램은 침식 위험도가 높은 곳에서 보전 대책의 적용 없이 경작하거나, 습지를 경작지로 전환하려 할 때 기존에 농민에게 주던 수혜를 거부할 수 있다 (Stubb, 2012).
    - 초지 파괴 경작: 1985년 농가법에서 발효된 고침식 위험 토지 보전법은 연방 농업 수혜와 토양 보전을 위한 최소한의 대책 시행을 교환한다는 개념에서 도입되었다. 고침식 위험 토지로 구분된 토지 중에서 1980년에서 1985년 사이에 경작되지 않은 토지를 초지 파괴 경작(sodbuster)이라 일컫는 새로운 경작을 하고자 할 때, 1990년 이후에는 토지가 언제 생산에 돌입 했는지와 관계없이 고침식 위험지를 경작할 때 기존 혜택의 상실을 적용하게 된다. 이 분류에 해당하는 토지는 토지 사용자가 승인된 보전 프로그램을 경작에 적용하기 동의하면 USDA 프로그램 수혜 자격이 있는 것으로 인정하고 있다.
    - 습지 파괴 경작: 습지 파괴 경작 또는 습지 보전 안은 초지 파괴 경작을 습지에 원용한

것이다. 1985년 12월 이후에 습지를 개간하여 경작하거나 1990년 11월 28일 이후에 농산품의 생산이 가능하게 하면 USDA 프로그램 수혜 대상이 될 수 없다. 이는 습지를 배수, 복토, 또는 균평 작업 등으로 농업이 가능하게 하면 준수에서 제외하게 된다.

- 초지 보호 경작: 2008 농가법은 작물 보험 제목(12020절) 하에서 초지 보호 경작이 만들어 짐. 초지 보호 경작 안은 경작 첫 5년 동안 작물 보험과 비보험 작물 재해 보조 프로그램(non-insured crop disaster assistance program, NAP)에 부적격인 자연 초지에 피보험 작물( 5 에이커 이상) 재배를 재배할 수 있게 된다. 2008년 대평원 포틀 국립 우선 지역(Prairie Pothole National Priority Area)의 원초지의 농경지 전용하는 경우 주에 의해 적용할 것이 언급되었다.

### ③ 지하수 현황 및 정책

- 미국의 지하수 관리는 연방정부와 주정부의 이원화된 체계이다 (박중원, 2016).
  - 연방정부가 기본적인 정책을 수립하고, 구체적인 정책의 수행은 주정부가 주로 담당한다.
  - 연방정부기관 중에는 내무부(Department of the Interior), 농무부(Department of Agriculture), 에너지부(Department of Energy), 국토안보부(Department of Homeland Security)와 환경보호청(EPA)의 5개 기관이 관여한다.
  - 이들 기관은 지하수 관리에 관한 법령, 지침, 기준 등의 전반적인 사항을 제시하고 주정부의 지하수 관리정책을 뒷받침할 인적 자원 및 재정 등을 지원하는 역할을 담당하고 있다. 주정부가 각 주의 대수층 특성과 오염원 분포현황에 맞는 정책과 제도를 수립하고 지하수 개발, 이용 및 수질을 관리 감독하는 실질적인 권한을 행사한다.

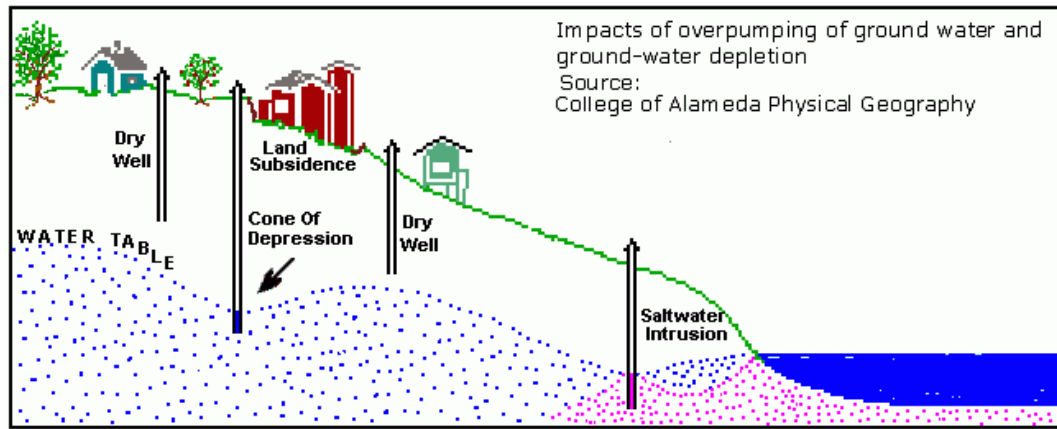
### ㉞ 지하수 환경관련 이슈 및 현황

- 미국의 물관련 주요 토픽으로는 음용수로서의 지하수 수질 관리(식수 내 납 문제)와 개인 관정 관리를 통한 식수원 보호, 하수 및 폐수처리, 오염물질 배출 관리, 물공급 인프라 및 재정 구축, 기후변화에 대응한 물의 탄력적 이용(water resilience) 제고 등이다 (EPA, 2017a).

### ■ 지하수 고갈(groundwater depletion) (USGS, 2016)

- 미국의 많은 지역에서 지하수의 지속적인 양수로 인한 지하수 고갈이 오랫동안 문제가

되고 있으며, 이는 우물 건조, 하천과 호소수의 감소, 수질 악화, 양수 비용 증가, 지반침하 등을 유발한다 (그림 3-46 참조).



자료: USGS (2016)

<그림 3-46> 지하수 고갈에 따른 영향

- 미국의 많은 지역에서 지하수 고갈 문제가 보고되고 있다 (그림 3-47 참조).
  - 미국 서부지역은 장기간의 가뭄과 인구증가로 물 공급이 부족하고, 특히 캘리포니아 주는 지하 대수층 의존율이 60%에 이르며, 중부 High Plains 지역의 대수층은 다량의 농업용수 사용으로 저장량이 감소하고 있다.
  - 미국 대서양 해안 평지지역 중 뉴욕의 Long Island 지역은 생활용수 공급을 위한 지하수 양수로 지하수위가 저하하거나 하천 기저유출이 사라지고 염지하수가 내륙 쪽으로 이동하였다.
  - Massachusetts주는 지하수 개발로 지표수량 감소하였고, New Jersey, South Carolina, Georgia, Florida 등 해안지역은 염수 침입의 문제가 있다.
  - 중부 Florida의 서부지역에서는 지하수 개발로 싱크홀로 인한 지반침하, 염수 침입, 호수의 지표수 고갈 등의 문제 발생으로, 해수 담수화시설로 대체하였다.
  - 걸프 해안 평지지역인 Texas의 Houston에서는 지하수위 저하가 120m 발생하였고, 광역적인 지반 침하도 3m까지 초래하였다.
  - 전세계에서 지하수에 의존하는 가장 큰 대도시지역중 하나인 Tennessee의 Memphis지역은 다량의 양수로 인해 광역적인 지하수위가 21m까지 하강하였고, Ogallala 대수층을 포함하는 중부의 High Plains 대수층은 8개 주에 걸쳐 분포하는데 관개용으로 집중적으로 개발되면서 지하수위가 30m이상 하강하고 포화대의 층후도 절반이상으로 감소하였다.

- 태평양 연안 북서부지역의 Columbia River Basalt 대수층도, 관개, 공공급수, 산업용 등을 위한 지하수 개발로 지하수위가 여러 지역에서 30m이상 저하되었다.
- 남서부 사막지역인 Arizona주는 인구증가에 따른 지하수 개발로 지하수위가 90 - 150m 정도 하강하였고, 지반침하는 1940대에 처음 관측되었는데 4m까지 측정되었고 또한 지하수 위 저하는 하천변 식생의 손실을 초래했다.
- Chicago 지역에서는 1864년이래로 지하수를 사용했는데 주변지역 820 만 명의 유일한 식수 원으로 지하수가 이용되고 있는데, 장기간의 양수로 인해 지하수위는 270m까지 하강했다.

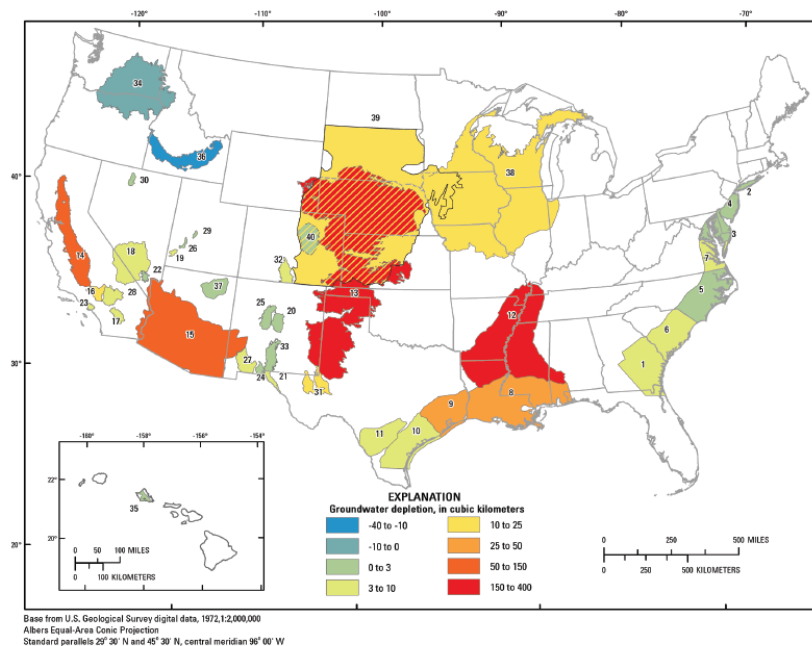


Figure 2. Map of the United States (excluding Alaska) showing cumulative groundwater depletion, 1900 through 2008, in 40 assessed aquifer systems or subareas. Index numbers are defined in table 1. Colors are hatched in the Dakota aquifer (area 39) where the aquifer overlaps with other aquifers having different values of depletion.

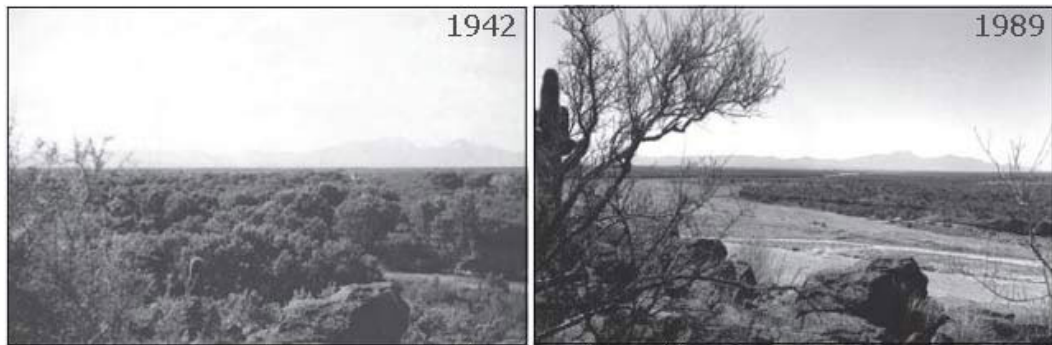
자료: USGS (2016)

### <그림 3-47> 미국의 지하수 고갈 상태(1990-2008년)

#### ■ 지하수와 가뭄

- 미국은 수리학적으로 가뭄일 때, 지하수는 다음의 관점에서 중요성을 나타내고 있다 (USGS, 2016).
  - 지하수량이 풍부할 경우, 지표수 가뭄동안 대체 용수원으로 이용가능하다.
  - 미국의 하천유량의 평균 50%이상이 지하수에 의해 유지된다.
  - 지하수위 감소 시 주변 지표수원의 수위와 유량감소를 초래한다.

- 지표수-지하수 상호작용의 변화로 인해 수질에도 영향을 초래한다.
  - 기저유출 감소로 인해, 지하수 공급에 의존하는 수생태계에 영향을 초래한다.
  - 대수층 수위 저하로 지반침하 발생한다.
- 아리조나 주 Tucson 남부의 Santa Cruz 하천 구간은 1942년에는 하천변을 따라 여러 식생들이 존재했지만, 주변 관정 관측에 의하면, 양수에 의해 지하수위가 30m이상 하강하였는데 이러한 작용이 식생 감소의 주 원인으로 작용하면서, 식생의 변화를 초래하였다 (그림 3-48 참조).

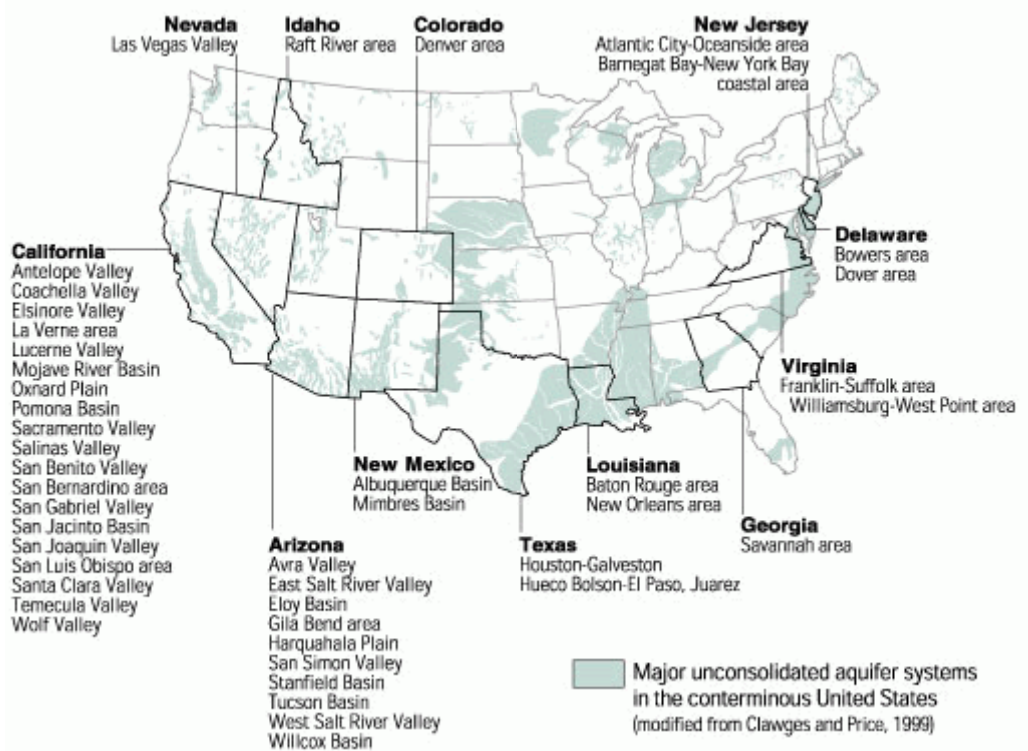


Santa Cruz River near Tucson, Arizona. Photo by Robert Webb, USGS  
 자료: USGS (2016)

<그림 3-48> 지하수위 저하로 인한 아리조나주 산타크루즈강 근처 하천변의 식생 변화

### ■ 지반침하 (USGS, 2016)

- 미국에서 지반침하 발생<그림 3-49 참조>는 Texas, Florida등에서는 많은 경제적 손실을 야기하고 있다. 미국 내에서 45주에 걸쳐 17,000 평방마일의 지역이 침하의 영향을 직접 받고 있고 이중의 80%는 지하수 이용에 의한 것이다.
- 지반침하의 주요 원인은 대수층내의 토양 압밀, 유기질토양의 배수, 지하 채굴, 수압압축 (hydrocompaction), 자연압밀, 싱크홀, 해빙 영구동토층 등이다.
- 건조한 남서부지역과 석회암, 증발잔류암 등 용해도가 높은 암석이 분포하는 습윤 지역에서 지반침하가 발생할 가능성이 높다.
- 일부 대수층에서 과잉 양수에 의한 압밀이 가장 큰 침하의 원인으로 작용하며, 대량으로 지하수를 양수하면 토양층이 압밀되어 빈공간의 수와 크기가 줄어들고 대수층의 총 저류량이 영구적으로 감소하는 결과를 초래할 수 있다.



자료: USGS (2016)

<그림 3-49> 미국의 지하수 양수로 인한 대수층 압밀에 기인한 침하 발생 지역

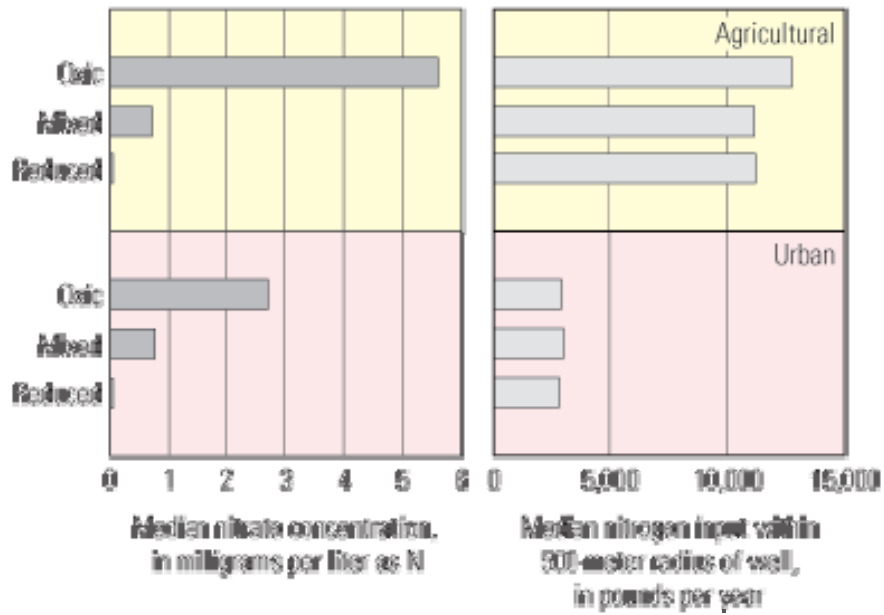
### ■ 지하수 수질 문제(지질기원의 자연유래 물질, 질산염, 살충제, 제설용 소금 등)

- 미국 내에서 지하수는 시골지역의 개인관정에서 중요한 음용수원에 해당한다 (USGS, 2016).
  - 2005년 기준으로 4,300 만명의 미국인이 개인급수에 의존하고 있는데 이 중 99%이상은 지하수에서 공급하고 있다.
- 2009년 USGS의 개인관정에 대한 시범조사에 의하면 조사관정의 23%에 잠재적 건강 위험 수준의 오염물질이 최소한 한 개 이상 존재한다.
  - 라돈, 비소, 우라늄, 망간, 질산성 질소 등이 대표적인 오염물질로 대부분 자연적인 지질기원에서 유래하나, 질산성 질소는 정화조나 비료 등 인위적 기원에서 유래된다.
  - 라돈의 경우는 결정질암 대수층에서 우세한데 북동부지역, 중부와 남부 Appalachia 산맥, Colorado 등이 대표적이다.
  - 미국 북부 지역에서는 제설용 소금(road salt)이 주요 관심사이다. 도로에 뿌려지는 과량의

나트륨과 염화물이 지하수에 영향을 준다.

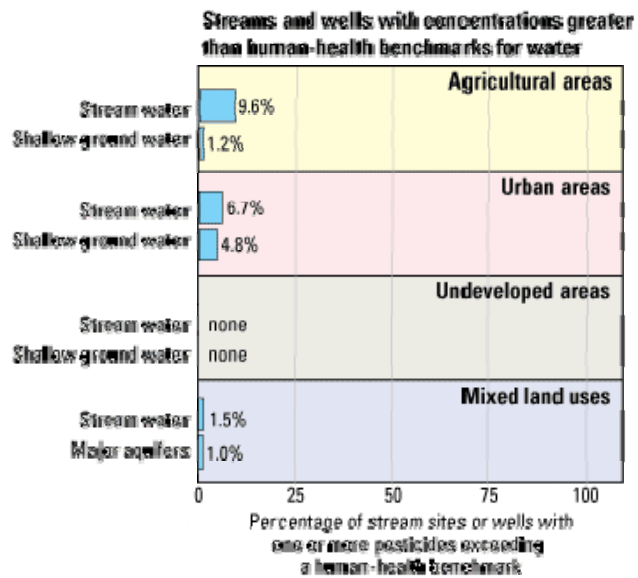
- 농촌지역의 상수도에서 가장 흔한 수질문제는 하수처리시설이 없는 농촌지역에서 사용되는 오수 정화조에 의한 세균 오염이다. 정화조에서 나오는 하수가 가정용 지하수 관정 내로 유입되면서 지하수내 박테리아 검출 등이 문제가 되고 있다. 미국 내 농촌지역의 가정용 급수시설(지하수 관정)에는 염소 처리와 같이 정수처리하지 않는 곳이 대부분이다.
- 식수원으로서 지하수 이용이 높은(30% 이상) 캘리포니아주는 EPA와 함께 2013년부터 현재(2017년 3월)까지 주 전역에 버려지거나 잠재적으로 누출될 가능성이 있는 157개 사이트에 위치한 381개의 지하 석유 저장 탱크에 대하여, 정화 및 점검을 수행하여, 지하수의 잠재적 오염을 방지와 위협을 감소시키는 등의 노력이 지속적으로 이루어지고 있다 (EPA, 2017b).
- 이외에도 지하수에서 발견될 수 있는 화학물질 및 오염물질은 자연기원과 인위적 기원에 의해 발생할 수 있으며, 관련 오염물질로는 다음과 같다 (USGS, 2017b).
  - 철, 망간 등의 금속
  - 폐기물 처리수, 연료 및 독성 화학물질의 유출
  - 잔디와 농작물에 적용되는 살충제와 비료의 축적
  - 황하수소 및 기타 자연발생 물질
  - 석유, 유기화합물 등 인위적 화학물질의 유입
  - 정화조 및 하수처리시설의 누출에 의한 박테리아의 유입
- 하천과 지하수에 대한 질소와 인 등 영양염류에 대해서는 1992-2004년까지 NAWQA 프로그램에서 미국 전역에 걸쳐 조사가 수행한바 있다 (Dubrovsky et al., 2010).
  - 조사 결과는 영양염류 부하가 하천의 생태계 악화의 광범위한 원인이며, 음용수로 이용되는 지하수의 질산성 질소 오염이 건강상의 우려를 유발하였는데 특히 농업지역의 천부 관정에서 심각한 것으로 나타났다.
  - 전국에 걸친 연방정부, 주정부, 지자체 수준에서의 주요 비점오염 저감 노력에도 불구하고 비점오염원에서 유래한 영양염류의 영향 저감은 제한적이었으며 하천과 대수층의 농도수준은 그대로 유지되거나 오히려 증가하여 수생태계와 건강에 대한 위협을 야기할 수 있다.
  - 질산성 질소는 농업, 도시지역 천부관정의 64%가 배경농도를 초과하였고 농업지역의 경우 3.1 mg/L의 중앙값을 보인다.
    - 질산성 질소 농도는 영양염류 공급원뿐만 아니라 지하수 연령과 지구화학적 조건에도 영향을 받는데 지표에서 유사한 질소 부하량을 가지더라도 농업지역의 호기성 지하수의 질

- 산성 질소 중앙값은 5.5mg/L인 반면 혐기 지하수에서는 질소가 거의 검출되지 않았다.
- 1950년 이전 함양되었고 산소농도가 낮은 지하수가 먹는물 수질기준을 초과하는 사례는 확인되지 않았다.
  - 1970년대 중반전까지 토양층이 보호여과작용에 의한 대수층까지 살충제가 도달하지 않는 것으로 생각되었으나 최근 연구에 의하면 농업지역의 경우는 살충제가 중요한 지하수 수질 오염원으로 작용하고, 지표에 살충되는 살충제가 관정까지 도달하는데 걸리는 시간 등으로 주요 오염물질로 관리되지 못하고 있다 (USGS, 2016).
    - 일부 살충제들은 EPA에 의해 음용수 기준의 최대오염물질한계(MCL)의 수질기준이 설정되어 있으나 상당수는 기준이 없다.
  - 미국 USGS의 NAWQA 사업 조사 결과에 의하면 조사된 모든 지표수에서 하나 이상의 살충제가 검출되었으며 연중 농업지역에서는 97%, 도시지역에서는 97%, 혼합지역에서는 94%의 시기동안 검출되었다 (Gilliom et al., 2006).
    - 유기염소계 살충제는 현재는 더 이상 사용되지 않지만 물고기와 퇴적물에서 해당물질 또는 분해산물이 검출되어 환경 내에서 지속성이 크다.
    - 지하수는 상대적으로 살충제 검출빈도가 낮다. 도시와 농업지역의 천부지하수의 50%가 하나 이상의 살충제 화합물을 포함하고 있고, 주요 급수원인 심부 대수층은 1/3에서 하나 이상의 살충제 또는 분해산물이 검출되었다.
    - 전체 조사 하천의 10%이하와 1%의 관정에서 건강상 수질기준보다 높은 살충제 농도가 검출되어, 살충제 검출빈도는 높지만 실제 건강상의 위험도는 크지 않은 것으로 나타났다. 농업, 도시지역에서 고농도 살충제 검출빈도가 상대적으로 높았으나, 미개밭지역에서는 해당 사례가 발견되지 않았다.
    - 아트라진 검출 예측 결과에 따르면, 50% 이상의 농경지에서 아트라진 검출이 예측되고 있음. 특히, Indiana와 Ohio에서 특히 두드러지지만, 전반적으로 지하수에서는 비교적 낮은 atrazine 검출 빈도를 나타낸다.
    - 살충제로 인한 인간건강의 영향에 대한 충분한 연구가 완료되지 않은 현재에는, 지하수 내 살충제 성분의 검출을 잠재적인 오염물질로 인지하고, 관리가 요구된다.



자료: Dubrovsky et al.(2010)

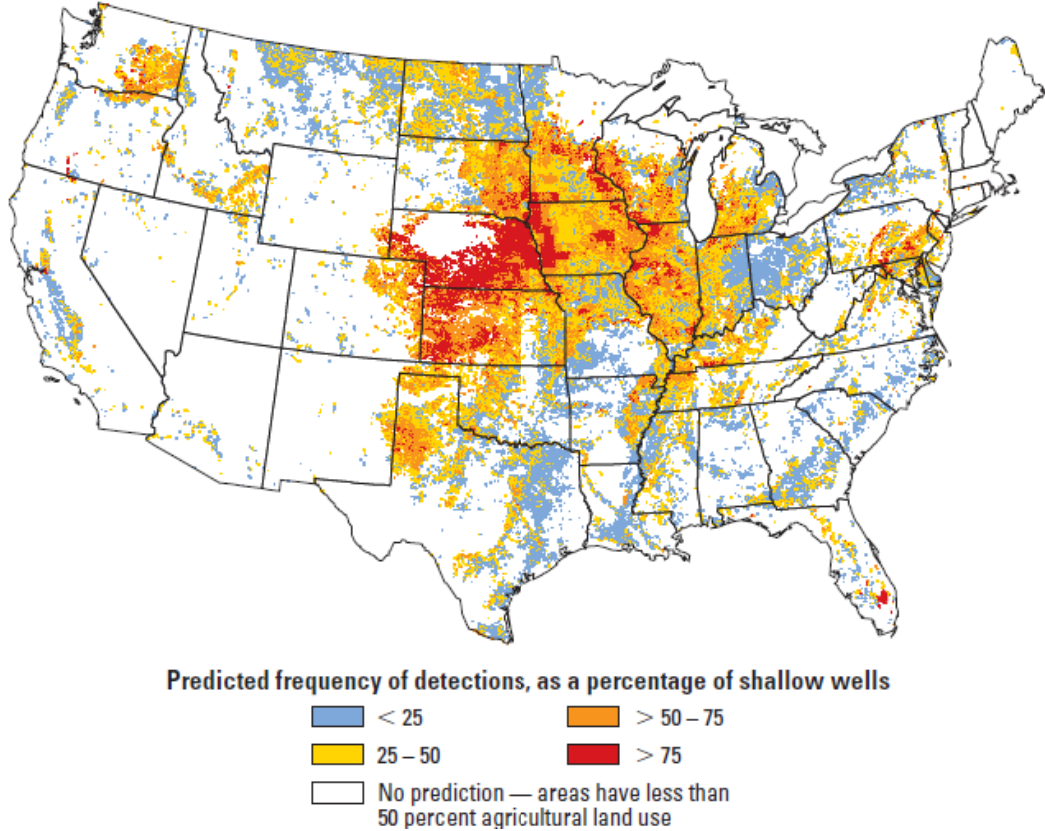
<그림 3-50> 미국 농업, 도시지역 천부관정의 질산성 질소 농도와 질소 부하량



자료: Gilliom et al.(2006)

<그림 3-51> 미국의 건강상 수질기준을 초과하는 살충제 농도를 가진 하천과 관정의 비율

Predicted occurrence of atrazine in ground water



자료: Gilliom et al.(2006)

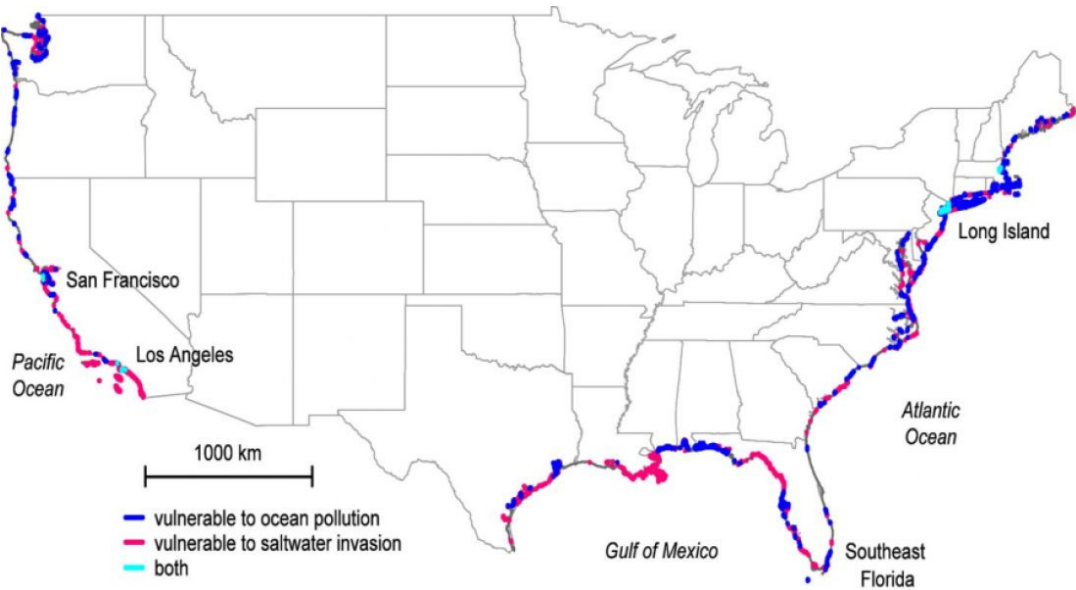
<그림 3-52> 미국 지하수 내 아트라진(atrazine)의 검출 예측도

### ■ 셰일가스·오일 개발 시 수압파쇄로 인한 지하수 오염

- 2010년 미국 의회의 요구에 따라 EPA가 수압파쇄의 유해 논란에 대한 연구에 착수하였고, 그 결과 수압파쇄가 지하수와 식수 오염을 광범위하게, 또 조직적으로 초래하고 있다는 흔적을 발견할 수 없었다고 보고했으나, 안전규칙을 제대로 지키지 않으면 수질이 오염될 가능성이 있음이 지적되고 있다 (김용철, 2016).
- 환경적 우려는 수압파쇄를 위한 지표수와 지하수의 사용, 누출되는 가스의 이동과 이로 인한 주변 대수층에 대한 영향, 역류(flowback), 공극수(formation fluid)등의 지표수와 지하수를 오염시킬 수 있는 폐기물의 잠재적 영향 등을 포함하고 있다 (Kappel, et al., 2013).

### ■ 해저유출수(SGD)로 인한 지하수 오염 및 해수침투

- 지하수자원이 해저로 유출되는 해저유출수로 인해 해양오염과 해수침투 발생이 보고되고 있다 (그림 3-32 참조).



자료: USGS(2016)

<그림 3-53> SGD에 의한 해양오염지역과 해수침투지역의 위치를 보여주는 SGD 핵심지역 지도

### ■ 지중 주입에 의한 지하수 오염 예방 관리

- 주입정은 심부 공극성 지층에 유체를 정체시키기 위해 사용되는 관정으로 CO<sub>2</sub> 저장, 폐기물 처분, 석유 생산 증진, 광물 채굴, 염수침입 방지 등의 다양한 용도로 이용되나 지중 주입으로 인한 지하수 오염의 가능성이 대두되고 있다.
  - 주입정의 활용은 1930년대에 석유생산과정에서 생성된 염수를 처분하기 위해 시작되었고, 1950년에는 화학 회사들이 산업 폐수를 심정에 주입했다.
- 이에 미국에서는 안전음용수법(SDWA)에 의거 지중 주입 관리(UIC: Underground Injection Control)를 위한 프로그램을 개발하여, 대수층에 주입된 유체로 인해 공공급수시설이 음용수 수질기준을 초과하지 않도록 관리하고 있다.

### ㉠ 지하수환경 보전 정책

- 미국은 전체 수자원에서 지하수의 비중이 높은 편이고 관개용수, 개인급수시설, 축산용수, 공공급수시설에서의 비중도 높고, 전체적으로 미국인의 절반정도가 음용수를 지하수에 의존하고 있어 특히 중서부나 서부지역의 농업은 지하수에 대한 의존도가 높은 편이다 (고동찬, 2016).

- 미국의 지하수 관리는 경제적이거나 공중보건측면에서 매우 중요하기 때문에, 미국 EPA에서는 주로 지하수 수질이나 오염물질 유출 방지 등과 관련한 안전음용수법, 청정수법, 자원 보존과 회수법 등 다양한 법을 제정했다 (고동찬 2016: 표 3-35 참조).
- 따라서 주로 지하수 수질관리와 관련하여 유일근원 대수층, 지중주입 관리, 지중저장 탱크 관리 프로그램이나 지하수를 수원으로 하는 시설이 포함된 원수보호, 공공급수 관리 프로그램도 운영하고 있다 (고동찬, 2016).
- 이러한 규정과 운영체계를 통해 지하수를 통한 안전한 음용수 공급과 환경과 공중보건에 대한 위해도 저감 등을 실현하고 있다.

<표 3-35> 미국의 지하수환경 주제별 주요 법·제도·지침·관련 프로그램 현황

Top Topic	주요 법·지침	관련 프로그램
- 지하수 이용·공급 - 지하수 원수 관리 - 수량, 수질 관리 - 보전구역 설정	- Ground Water Rule (GWR)  - 안전음용수법(SDWA)	-  - 수원보호프로그램(WHP) - 원수보호프로그램(SWP)
- 지하수 측정망 구축, 운영 - 지하수위·수질 측정		- 국가지하수모니터링네트워크(NGWMN, National Ground-Water Monitoring Network) Program(물환경정보자문위원회, ACWI 및 USGS) - NWIS (USGS) - STORET (EPA) - STEWARDS(USDA ARS) - WQP
- 지하수 수질 관리 - 수질기준 설정	- 맑은물법(CWA) - 안전음용수법(SDWA)	- 국가수질평가(NAWQA; National Water-Quality Assessment) Program (USGS)
- 지하수 오염 관리	- 안전음용수법(SDWA) - 자원보전과 복원법(RCRA) - 종합환경 응답·보상 및 책임법(CERCLA) - 맑은물법(CWA) - 연방살충·살균·살서제법(FIFRA)	- USTs - UIC
- 지하수 의존형 생태계 - (GDE) 관리 - 지하수-지표수 통합 관리(연계)		- Groundwater-Streamgage Project(USGS) - SSWR research program, - wetland reserve program (USDA NRCS) - Conservation Reserve program (USDA) - national Wetland Inventory (FWS)
- 지열에너지 관련		- UIC class II or V,

자료: 김용철(2016) 원고

<표 3-36> 미국의 지하수환경 관련 법제도

주요 법.제도	목적	주요내용
<p>안전음용수법 (Safe Drinking Water Act, 1974)</p>	<p>미국 내 음용수 수질 보호</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지상이나 지중 기원의 음용 목적의 실질적, 잠재적 모든 물에 대해 적용</li> <li>- 이 법은 EPA가 음용수를 보호할 최소한의 기준을 수립하고 공공급수시설이 건강관련 일차 기준을 준수하도록 요구하는 권한을 부여</li> <li>- 이 법에 의해 EPA는 지중주입에 의한 음용수의 지중 근원을 보호하는 주정부 프로그램에 대한 최소 기준을 설정</li> <li>- 안전음용수법의 준수 감시를 위해 공공급수시설 관리 프로그램과 지중주입 관리 프로그램 운영</li> </ul>
<p>청정수법 (Clean Water Act)</p>	<p>미국 내 수계에 오염물질의 유출과 지표수의 수질 기준을 관리하기 위한 기본 구조를 설정하기 위해 제정</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이 법의 근간은 1948년에 제정된 Federal Water Pollution Control Act인데, 1972년에 많은 부분이 재구성되고 확장</li> <li>- EPA는 이 법에 의해 산업체의 폐수 기준을 설정하는 등의 오염 관리 프로그램을 실행하고 있고, 지표수에서 모든 오염물질에 대한 수질기준을 설정</li> <li>- 이 법하에서 점오염원에서 허가를 받지 않고 수계에 오염물질을 유출하는 것은 불법임</li> <li>- CWA는 지표수로 오염원 배출을 규제하고 있으나, 주정부 법령은 지하수로의 오염원 배출까지 포함하는 경우도 있음</li> <li>- CWA는 지하수 오염을 직접 다루고 있지는 않음</li> </ul>
<p>자원보전과 회수에 관한 법 (Resource Conservation and Recovery Act; RCRA, 1976)</p>	<p>생활고체폐기물, 하수처리장 슬러지, 산업폐기물 등의 고체폐기물 관리를 위한 국가적 체계의 개요를 구축하기 위해 제정</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비유해 고체폐기물을 다루는 Subtitle D와 유해 고체폐기물을 다루는 Subtitle C, 지하수와 관련하여 중요한 지중저장탱크(underground storage tank) 관리를 위한 Subtitle I가 있음</li> <li>- Subtitle D의 규정은 비유해 고체폐기물의 야외 방치 (open dumping)를 금지하며 설계, 위치제한, 정화, 폐쇄 등을 포함한 매립장의 운영 기준을 정하도록 함</li> <li>- Subtitle C 규정에 의해 유해 고체폐기물을 발생부터 최종 처분까지 안전하게 관리하는 것을 보장하기 위한 종합적 프로그램을 개발함</li> <li>- Subtitle I는 지하수 오염에 잠재적으로 가장 큰 위협이 되는 석유류나 유해물질을 저장하는 지중저장탱크의 관리를 위한 규정임</li> </ul>
<p>CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, 1980)</p>	<p>연방정부로 하여금 공공의 건강과 환경에 위해를 주는 유해화학물질의 누출 또는 누출가능성에 직접 대응할 수 있도록 하고 있으며, 이를 위해 화학, 석유산업에서 세금을 징수</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 사용 종료되었거나 방치되어 있는 유해폐기물지역<sup>6)</sup>으로부터 공공의 건강, 재산 및 환경에 위협을 가할 수 있는 유해물질의 유출 또는 유출위험에 대응할 수 있는 체계가 구축</li> <li>- 이들 지역으로부터 유해폐기물의 누출에 책임이 있는 자들의 책임범위를 지정하고 있으며, 오염 책임자가 확인되지 않을 경우에 오염을 정화하기 위한 기금을 마련</li> </ul>

자료: 고동찬(2016), 김용철(2016) 원고 재구성

<표 3-36의 계속>

주요 법.제도	목적	주요내용
Ground Water Rule (GWR, 2006)	지하수 및 지표수-지하수 혼합수를 수원으로 하는 급수시설의 음용수 수질을 개선하고 질병유발 미생물로부터 보호하기 위함	- 관련 제도 - 위생 조사 - 수원 물 모니터링 - 심각한 결함이 있는 수처리 기술이나 수원지 대장균 오염지의 시정 조치 - 대중에게 공지 및 정보 제공 - 공급체계에 대한 보고 및 기록 유지 - 주를 위한 우선, 보고, 및 기록유지 - 수질 변이 및 면제 요건

자료: 고동찬(2016), 김용철(2016) 원고 재구성

### ■ 원수보호 프로그램(Source Water Protection) (고동찬, 2016)

- 지표수 또는 지하수는 음용수 공급원의 영향을 하게 되는데, 이를 원수(source water)라고 하며, 공공급수시설은 음용수 공급을 위해 수처리를 하게 되는데 source water를 오염으로부터 보호하면 이러한 수처리비용을 줄 일수 있고, 오염된 물에 노출되는 공중보건상의 위험을 저감시킬 수 있다.
  - 원수 평가 (source water assessment; SWA)는 음용수원의 보호를 위한 정보를 제공할 수 있다.
  - 1996년 수정된 SDWA에서는 공공급수시설에 대한 원수 평가의 6단계 제시한바 있으며, 단계별 상세내용은 다음과 같다.
    - 1단계 - 원수 보호 구역의 설정: 공공급수시설이 용수를 취수하는 지역에 근거하여 보호되어야하는 지역을 설정
    - 2단계 - 기존·잠재 오염원 조사: 음용수 공급과 관련하여 잠재적으로 위협이 될 수 있는 모든 기록·잠재 오염원 또는 활동을 기록
    - 3단계 - 원수보호 구역 내에서 오염원에 대한 공공급수시설의 취약성 결정: 조사된 오염원의 특성과 원수 오염 가능성을 연관시켜 공공급수시설의 조사된 오염원의 위협에 대한 취약성을 결정
    - 4단계 - 확인된 오염원에 의한 위협성과 의미를 공지: 효과적인 프로그램을 통해 대중이 오염방지를 수행하도록 필요한 정보를 제공함
    - 5단계 - 음용수 공급에 대한 위해도를 저감할 수 있는 관리 조치를 구현: 평가된 정보들은 원수를 보호하기 위한 조치를 수립하고 구현하는 것을 지원하도록 하며, 이러한 조치

6) 단순히 유해 폐기물이 '매립' 된 지역만을 얘기하는 것이 아니라, 폐기물이 방치되어 있거나 처분되어 있는 지역을 의미한다.

는 각 급수시설에 대해 개별적인 위해도에 대처할 수 있도록 조정될 수 있음

- 6단계 - 급수시설 오염이나 중단에 대한 비상 계획 전략 개발: 단기 또는 장기적 급수시설 운영 중단에 대한 음용수 보호 프로그램의 일환으로 급수시설 대체 전략은 필수적인 요소임
- 지역적인 원수보호 조치에는 토지이용 규제, 토지 수용, 교육 등이 있음
- EPA의 자금제공 펀드로는 Drinking Water State Revolving Fund와 Clean Water Act State Revolving Fund가 있다 (김용철, 2016).

#### ■ 취수정 보호 프로그램(Wellhead Protection Program) (김용철, 2016)

- WHP는 1986년 SDWA 개정 시 음용수원을 오염원으로부터 보호하기 위하여 주정부로 하여금 프로그램을 개발하도록 요구하였다.
- 이 프로그램을 통해 주정부는 지역사회를 도와 공공급수 관정에 물을 제공하는 영역을 설정하고, 잠재오염원을 확인하고, 잠재오염원의 위협을 최소화하도록 관리하고 비상계획을 수립하고 있다.
- 1990년대에 수립된 많은 WHP는 새로 제시된 수원평가 프로그램을 통해 현재 지속적으로 갱신하고 있다.

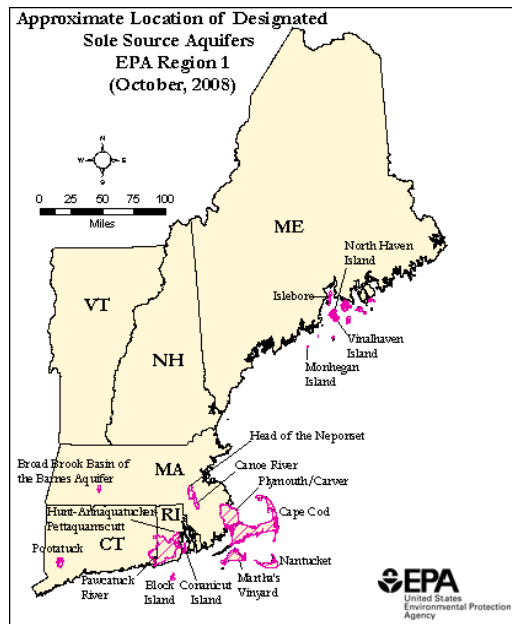
#### ■ 유일근원 대수층 프로그램 (Sole Source Aquifer, SSA) (고동찬, 2016)

- EPA에서는 대수층이 해당 급수지역에 대해 적어도 50%의 음용수를 공급하거나 대수층이 오염되면 합리적으로 가용한 대체 음용수원이 없는 경우에 유일근원 대수층으로 정의한다.
- SA 지정을 위한 청원을 제출하는 것을 돕기 위해 EPA에서는 1987년에 SSA Designation Petitioner Guidance를 발간하였는데 여기에는 대수층 경계 제안, 유일근원 대수층 여부 결정, 대체 음용수원 평가 등에 대한 절차를 포함하고 있다.
- SSA의 위치와 지도정보는 National Geographic Information Systems의 SSA layer에 제공되고 있고 National Environmental Policy Act하에서 주정부와 지자체수준에서 평가에 널리 활용하고 있다.
- 유일근원 대수층 검토 지역으로 설정된 지역에서 연방정부의 지원으로 수행되는 사업에 대해서는 대수층 오염 가능성에 대해 EPA가 평가하도록 한다.
- 검토 필요성이 있는 사업이 확인되면 해당사업의 재정을 지원하는 기관은 EPA 담당자에

계 평가를 위한 사업정보를 제공해야 한다.

- 평가후 해당 사업이 SSA를 오염시킬 가능성이 없다면 사업은 예정대로 진행할 수 있다.
- 만약 평가에 대한 자료가 불충분하면 EPA는 추가 자료를 요구할 수 있다.
- 사업이 대수층을 오염시킬 가능성이 있다면 EPA는 사업 변경을 협의하게 되며 만약 협의가 실패하면 연방정부 지원이 거절된다.

- EPA Region 1, New England Office에 의해 2008년 8월 기준으로 총 16개, Region 9, Pacific Southwest Office에 의해 9개의 유일근원 대수층이 설정되어 있다 (그림 3-54 참조).



미국 북동부 지역 SSA 현황

자료: EPA: 고동찬, 2016에서 재인용



미국 태평양 남서지역 SSA 현황

<그림 3-54> 미국 SSA 지정 예

■ 공공급수시설 관리 프로그램 (Public Water System Supervision; PWSS) (고동찬, 2016)

- 공공급수시설(public water system)은 1년에 60일 이상 15개소 이상이 연결되어 있거나 평균 25명이상의 급수인구에게 물을 공급하는 시설을 말한다.
- 미국정부에 의해 관리되는 공공음용수 시설은 90%의 미국인에게 음용수를 제공한다.
  - 미국 내에는 155,000개의 공공급수시설이 있으며 급수자, 급수원, 급수기간 등에 따라 다음 세 개의 시설로 구분된다.
    - 공동급수시설(community water systems; CWS): 연중 동일한 급수인구에게 물을 공급하

는 공공급수시설에 해당한다.

- 비일시적 비공동급수시설 (Non-Transient Non-Community Water System; NTNCWS): 연 중 6개월이상 25명이상의 동일한 급수인구에 정기적으로 물을 공급하는 공공급수시설로 자체 급수시설을 갖춘 학교, 공장, 사무실, 병원 등이 여기에 해당한다.
  - 일시적 비공동급수시설 (Transient Non-Community Water System; TNCWS): 급수자가 장 기간 체류하지 않는 주유소, 캠핑장 등의 장소에 물을 공급하는 공공급수시설에 해당한다.
- EPA에 의해 PWSS 프로그램에 대해 위임을 받은 기관은 예산의 지원을 받을 수 있는데, 이 예산은 각 주정부가 SDWA의 요구사항에 집행하기 위해 적절한 PWSS 프로그램을 개발, 수행하고 급수시설이 일차 음용수 규정을 준수하는 것을 보장하기 위해 사용된다.
- 프로그램의 주요 활동은 다음과 같다.
- 주정부 음용수 규정 개발과 유지
  - 주내 공공급수시설 목록 개발과 유지
  - 공공급수시설 규정 준수 정보 DB 개발과 유지
  - 공공급수시설 위생 조사 수행
  - 공공급수시설 관리자와 운영자에 대한 기술적 지원 제공
  - 공공급수시설이 소비자에게 정기적으로 수질에 대한 정보 제공을 보장하는 프로그램의 실행
  - 규정 준수여부를 결정하는 분석을 수행하는 기관의 인증

## ■ 지중 주입 관리 프로그램 (Underground Injection Control; UIC)

- UIC 프로그램은 대수층 보호를 위해 주입정에 최소요구사항을 정하고 있으며 이 목적은 주입된 유체가 관정과 의도된 주입구간 내에 머물고, 직접 또는 간접적으로 대수층에 주입된 유체로 인해 공공급수시설이 음용수 수질기준을 초과하지 않도록 하거나 공중보건을 해치도록 해서는 안 된다는 목적을 가진다 (고동찬, 2016).
- EPA는 주입으로 인한 위해성평가를 수행하여, 지하수 및 환경오염의 영향이 적음을 증명하기도 한다.

<표 3-37> UIC 주입정 등급별 관정 용도

주입정 등급	관정용도	세부 구분
Class I	산업, 생활 폐수 처분	유해 폐기물 처분, 비유해 산업폐수 처분, 생활 폐수 처분, 방사성 폐기물 처분
Class II	석유, 가스 관련 주입	처분, 증진회수, 석유류 저장
Class III	용해 광물 채굴	우라늄, 염, 구리, 황 등의 채굴
Class IV	유해·방사성 폐기물 천부 주입	현재 이 등급의 관정은 지하수 정화목적으로만 운영됨
Class V	비유해 유체의 주입	중력 배수를 이용하는 상업, 공공의 단순 주입관정이나 중력·압력주입을 사용하는 고도주입 관정
Class VI	CO <sub>2</sub> 의 지질학적 처분	CO <sub>2</sub> 의 장기 저장을 위한 등급으로 CO <sub>2</sub> 의 부유성, 지중 이동성, 부식성, 대량 주입체적 등을 고려하여 관리규정 설정

자료: 고동찬(2016)

#### ■ 지중저장탱크(underground storage tank; UST) 관리 프로그램 (고동찬, 2016)

- RCRA의 Subtitle I에 근거한 프로그램으로 지하수 오염 방지와 관련하여 중요한 역할을 하고 있다.
  - UST는 지중에 위치한 체적이 10%를 초과하는 저장시설이나 저장시설과 연결된 배관을 말하며 연방 UST 규정은 석유류나 특정 유해물질을 저장하는 UST 시설에만 적용된다.
  - UST 관리 규정이 제정된 1984년 당시에는 미국 내에 210만개의 UST가 존재하였으나 기준에 미달하는 UST가 폐쇄됨에 따라 최근에는 56만개의 UST가 있는 것으로 파악된다.
  - UST 규정의 적용을 받는 유해물질을 보관하는 시설은 1만개 이하 일 것으로 추정된다.
  - 1980년대 중반까지 대부분의 UST 시설은 강철로 만들어져 시간이 경과함에 따라 부식되어 저장물이 누출될 가능성이 있고, 부실한 설치나 부적절한 유지 관리 또한 환경 오염을 유발할 수 있다.
  - UST의 가장 큰 위험은 저장물이 토양으로 유출되어 거의 절반의 미국인에게 음용수를 공급하는 지하수를 오염시킬 우려이며, EPA에 보고된 주별 자료를 보면 지하수 오염의 주요 원인을 사례수로 보면 UST, 정화조, 매립지 등의 순으로 UST가 가장 빈도가 높다 (EPA, 2002: 고동찬, 2016에서 재인용).
- EPA의 1988 UST 규정을 세부적으로 보면 기술적 요구사항, 재정적 책임 요구사항, 주별

프로그램 승인 목표로 구성된다.

- 기술적 요구사항은 UST로부터 누출가능성을 저감하고, 유출과 누출 발생시 검출하며, 즉각적 정화를 보증하기 위해 작성되어야 한다.
- UST 소유자와 운영자는 누출을 보고하고 정화할 책임을 지며, 재정 책임 규정은 누출이나 유출 사고시 소유자나 운영자가 정화를 수행하고 보상하는 것과 관련된 비용을 지불한 재원을 가지도록 하기 위해 설정된다.
- Subtitle I는 각 주는 연방정부 프로그램 대신 EPA의 승인을 받은 주별 UST 프로그램을 운영할 수 있도록 허용하며, EPA의 주별 프로그램 승인 규정은 주별 프로그램이 충족해야할 기준을 정하고 있어, 각 주는 연방 요구조건보다 더 강화된 규정을 적용할 수 있다.

#### ■ 국가물정보시스템(National Water Information System; NWIS) (김용철, 2016)

- NWIS는 USGS에서 제공하는 지표수, 지하수, 스프링 등 모니터링 정보를 실시간으로 제공하는 사이트에 해당한다.
  - 지하수 데이터베이스는 85만건 이상의 지하수, 샘, 시험공, 터널, 배수, 굴착 지점의 기록으로 구성되어 있다.
  - 위치정보, 관정심도 및 대수층 등에 대한 정보를 제공한다.
- 2016년 8월 22일 현재 1,521개의 실시간 모니터링 사이트가 있으며, 7,127개 사이트는 일자료를 제공하고, 867,230개소의 현장 관측자료도 제공한다.
  - 모든 자료는 인쇄하기 전에 검증과정을 거치며, 이를 통과한 자료는 “approved” 로 표시되며, 검증되기 전에는 “provisional” 로 표시된다.
  - 일, 월, 연간 통계자료도 제공된다.
- 수질자료는 1,948사이트에서 실시간으로 전송되며, 13,115개소는 일자료를 제공하며, 필드와 실험실 시료의 수질자료는 총 409,478개의 사이트 자료를 제공한다.
- 수질과 관련해서는 EPA에서 운영하는 STORET, USGS의 NWIS, USDA ARS의 STEWARDS의 자료를 WQX(Water Quality eXchange)를 사용하여 Water Quality Portal(WQP)에서 통합하여 제공한다.

## (다) 독일

### ① 배경

- 독일 국토의 면적은 3356,910km<sup>2</sup> 이고 육지 넓이는 349,223km<sup>2</sup> , 내수면 넓이는 7,798km<sup>2</sup> 로 유럽연합에서 7번째이며, 세계에서는 63번째로 넓은 나라이다.
- 지형은 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 차츰 낮아지며, 알프스 지대, 중앙 구릉 지대, 북부 독일 평야지대로 구분되며, 기후는 주로 온대 기후를 보이고 있다.
  - 알프스 산맥에서 독일 영토에 속하는 곳은 거의 산맥 북사면에 한정된다. 독일의 최고봉인 추크슈피체 산은 높이가 2,963m이다.
  - 알프스 전지는 빙하의 퇴적물로 덮여 있으며, 중앙 구릉 지대는 복잡한 지질구조를 가진 지괴 산지와 분지로 이루어져 있다. 동쪽의 에르츠 산맥과 서쪽의 라인 고지 사이에 하르츠 산지·튀링엔 숲 등의 소지괴가 있다.
  - 북부 독일 평야는 과거 빙하로 덮여 있어서 그 퇴적물이 남아 있고, 이탄지와 소택지도 많다.
- 국토에서 농경지가 50% 이상을 차지하고 있으며, 산림 30%, 거주 및 도로 지역 13%, 물 이용지역 2.4%이다.
  - 주요 하천으로는 독일의 산업 중심지를 흐르는 라인 강, 베저 강, 엘베 강과 폴란드와의 국경을 이루는 오데르 강이 있다.
- 인구는 2014년 기준 80,219,695명으로 유럽 연합에서 인구가 가장 많은 나라이며, 14개 자치주(Länder)와 2개의 자치적인 무역자유도시(Hansestädt)로 구성되어 있다.
  - 인구밀도는 222인/km<sup>2</sup>로 비교적 높다.

### ② 토양질 현황 및 정책

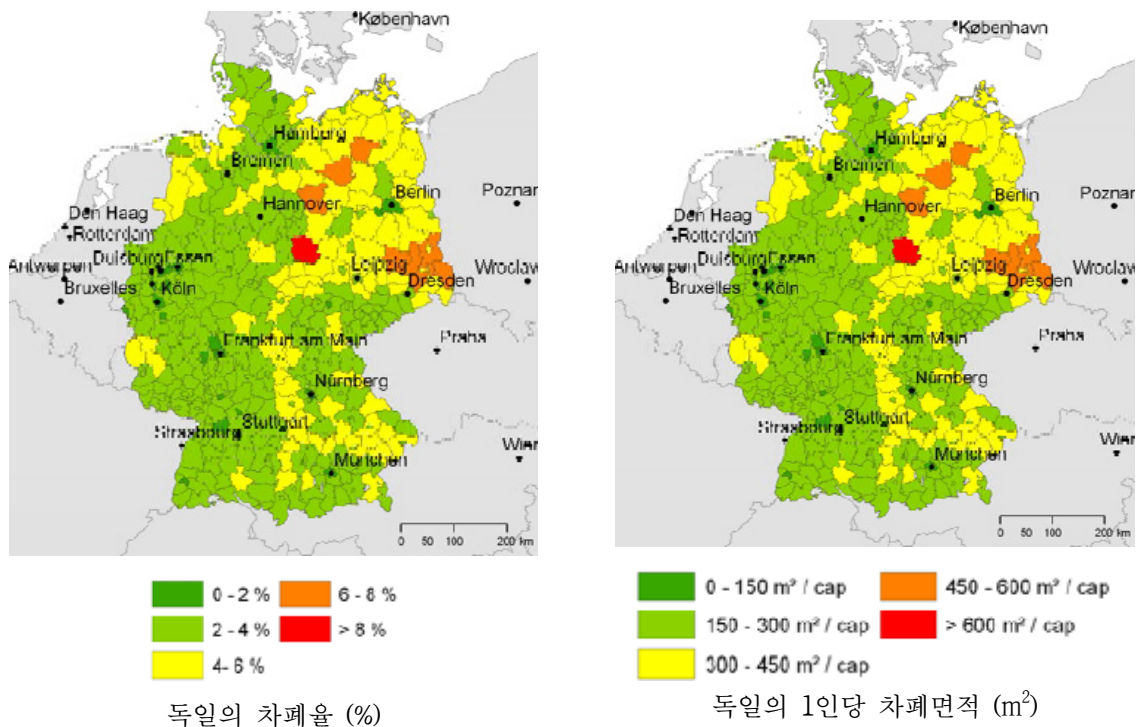
- 1980년대 초기, Bielefeld, Barsbüttel, Hamburg 지역 매립지에 건설된 주택에서 여러 사건이 발생하면서 토양오염이 사회적인 문제로 부각되었고, 연방정부는 토양오염부지를 1989년부터 등록 및 정화되기 시작하였다.
  - Franzius(1992)에 의하면 1992년 당시 잠재적 토양오염부지는 250,000개소일 것으로 추정하였으며, Prokop et al.(2000)에 의하면, 2001년 당시 잠재적 토양오염부지는 40만개소를 넘고 있다.

<표 3-38> 독일의 잠재적 오염부지 수와 종류

부지종류	부지 수(개소)
잠재적으로 오염 및 방치된 폐기물매립지	90,517
잠재적으로 오염 및 방치된 산업부지	112,368
잠재적으로 오염 및 방치된 이전의 군수물자 생산부지	202,885
잠재적으로 오염 및 방치된 군사 기지	3,240
잠재적으로 오염 및 정부의 군사 기지	공식 자료 없음

자료: Prokop et al., (2000)

- 2004년 현재 독일에 등록된 토양오염의심부지는 폐기된 폐기물처리부지 100,129개, 폐기된 산업공장부지 259,883개였으며 (Prokop et al., 2007), van Kierkerke et al., 2014)에 의하면, EC의 EIONET(2011)에 314,247개소의 잠재 오염부지가 등록되어 있다.
  - 1991년부터 1995년 기간 중에 연방정부의 환경부는 이전의 소련군 주둔지(WGT, West Group Troupe) 33,738개 부지에 대한 실태조사를 실시하였으며, 정밀조사가 필요한 부지는 10,808개, 즉각적인 조치가 필요한 오염부지는 전체의 12%인 4,010개로 나타난 바 있다.
  - EC의 EIONET(2011)에 등록된 잠재 오염부지 314,247개소 중에서 오염부지 25,085개소는 정화가 마무리 되었으며, 14,209개소는 오염부지로 남아 있다 (van Kierkerke et al., 2014).
  - 1980년대 중반부터 제기되는 토양이 오염된 부지인 ‘Altlasten’의 문제는 폐기물법 (Kreislaufwirtschafts- und-Abfallgesetz)을 포함한 기존의 법으로 해결하기 어렵고 토양오염을 방지하고 오염부지를 관리하기 위한 새로운 법의 필요가 제기되어, 연방토양보전법 (BBodSchG, Bundes Bodenschutzgesetz) of 17 March 1998, BBodSchG-Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998)을 1998년에 마련하였다.
- 독일 국토의 13% (약 11만km<sup>2</sup>)가 주민이 정주 또는 도로를 포함한 운송 기능을 맡고 있는 지역으로, 이 지역 부지의 반 이상이 차폐되어 있어 물의 함양과 생물다양성의 보전 등을 포함한 토양 본래의 기능을 상실하고 있다.
  - 독일 토양의 차폐율은 유럽연합의 평균인 365m<sup>2</sup>/인 보다 약 10% 낮은데, 이는 인구의 대부분 도시 지역에 거주하고 있기 때문이다.
  - 그러나 토양의 차폐율이 2000-2006년간 매년 1.3%씩 증가하여 2006년에는 249m<sup>2</sup>/인이며, 이는 유럽연합의 평균 증가 토양차폐율의 10%를 상회하고 있다.
    - 도시의 확장에 따른 독일 남서부지역, 특히 Ruhr basin Rarebit 지역과 인구 이동이 심한 동부지역에서 다른 지역보다 토양의 차폐율이 높다.



자료: EEA(2010), EUROSTAT(2010), Prokop et al.(2011)에서 재인용

<그림 3-55> 독일의 토양차폐 현황 (2006년 기준)

- 독일에서 침식은 강우량이 높지 않고 고저가 크지 않은 지형적인 이유에서 토양의 주요한 이슈가 아니다 (Froberg et al., 1994; Weingarten, 1997).
  - 독일 대부분의 지역에서 물과 바람에 의한 평균 토양의 손실은 1.1t/ha와 0.5t/ha으로 크지 않으며 남서부의 구릉지역에는 5.5ton/1ha 정도이다 (Deumlich, 1995).
    - 독일 북서부 지역의 지형의 고저차가 높은 Baden-Württemberg의 경우는 토양의 침식이 5.5t/ha으로 다소 높은 지역도 있다 (Gundra et al., 1995).
- 남서부 독일, 루어 유역 라레비트의 도시 확장에 따른 토양의 차폐는 유럽연합 국가들 중에서 가장 광범위하게 발생한 지역이다.
- 독일 도시지역에서는 거주지역과 교통시설에 의해 부지의 46%가 차폐되어 있다 (이는 전체 면적의 6%에 해당).
  - 지난 60년간 정주 및 도로 등의 교통시설이 차지하고 있는 지역은 크게 증가하여 46,000km<sup>2</sup>에 달한다. 이는 Lowry Soxony 주의 크기에 해당한다.

- 토양의 질을 저하시키는 요인으로부터 토양을 보호하기 위한 연방정부의 계획(Soil Protection Action Plan; Bundestags-Drucksache 11/1625)을 1987년에 수립하고, 이후 지속적으로 발전시키고 있다 (Federal Ministry for the Environment, Nature Protection and Nuclear Safety. 2002. German Federal Government Soil Protection Report. Bundestages-Drucksache 14/9566).
- 1985년 연방정부의 ‘종합토양보호구상’(Bundestags Drucksache, 10/2977)이 발표되고, 이를 실현하기 위한 구체적인 연구와 정책 활동이 활발히 진행되었고 이를 토대로 연방정부의 ‘토양보호계획’ (Bundestags-Drucksache, 11/1625) ‘를 마련하였다.
  - 토양보호계획에는 토양을 꼭 필요하고 재생할 수 없는 자원으로 인식하고, 농업이나 다른 용도로 인하여 상당한 오염이 발생되었을 때 재생할 수 없는 자원으로 규정되고 있다.
- ‘토양보호계획’ (1985)에 의하면, 토양은 인간과 동식물의 궁극적인 기반으로 물의 저장과 오염물질의 여과, 에너지와 재료를 저장하는 장소로써 농·임업을 지원하며 문화적인 역사의 정보를 담고 있는 반드시 필요한 자연자원으로 인식하고 있으며, <표 3-39>의 6개 목적으로 토양자원을 보호하고자 하는 것이다.

<표 3-39> 독일 토양보호의 목적

	내용
1	토양의 다양한 기능이 다음 세대에서도 이용될 수 있도록 한정된 토양자원을 보전
2	토양생물은 자연적인 토양의 기능을 보전하는 중요한 역할을 수행함. 생물다양성에 대한 국가전략에는 다양한 수단을 제공하여 토양생물의 기능 보전을 고려함
3	위험성으로부터 인간과 환경을 보호하기 위하여 오염부지와 위해성이 우려되는 지역은 등록되고, 조사, 평가되어야 하며, 필요시 복원되어야 함. 사전예방의 수단이 함께 적용
4	2020년까지 인간의 정주와 운송을 위한 부지의 개발은 2013년의 약 73ha/일에서 30ha/일로 감소되어야 함
5	토양은 다량의 이산화탄소를 함유하고 있음. 이는 기후변화에 중요한 역할을 하고 있음
6	토양에 악영향을 주는 물과 바람에 의한 침식은 감소되어야 하며, 토양의 유기물은 기후변화의 잠재적인 영향을 미치고 있다는 관점에서 보전

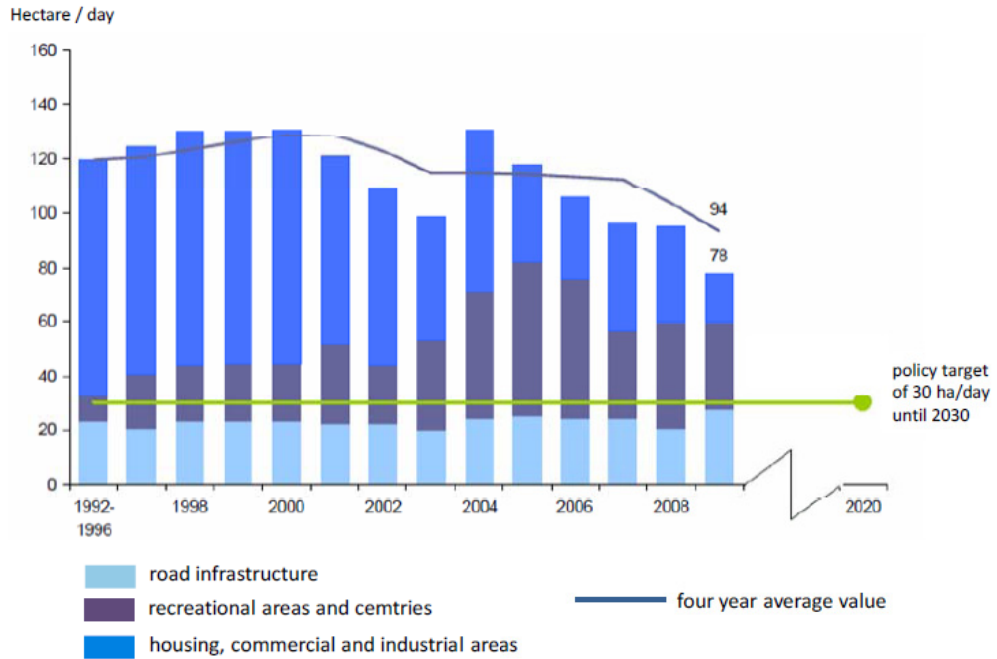
자료: Prokop et al. (2011)

- 독일의 토양보호정책의 비전은 “토양의 기능을 유지하고 회복하는 과학적이며 법에 기반을 둔 정책의 발전”이며, 연방토양보전법과 연방토양보호 및 오염부지법 (BBodSchG and BBodSchV)에 정책 이행수단을 제공하고 있다.
  - 연방토양보호법(BBodSchG)은 토양오염방지, 토양오염방지를 위한 사전고려의 원칙 적용,

오염된 부지의 조사 및 정화 뿐 아니라 지하수를 보전하고 함양하기 위한 토양의 차폐방지 등을 포함하고 있다.

- 연방토양보호법의 하위법령으로서 ‘토양보호 부담금 등록 법령(Verordnung über die Eintragung des Bodenschutzlastvermerks)’ 과 ‘연방토양보호 및 Altlasten 법령(BBodSchV, Bundes- Bodenschutz- und Altlastverordnung)’ 등이 있다.
    - ‘Altlasten’ 이란 환경문제 전문위원회로부터 작명된 새로운 용어로서, 오래된 폐기물의 매립·적재지와 오래된 공장부지 및 군부대 관련 입지이다.
  - 토양의 생태계 기능을 보호하고 지속가능한 주민 정주를 제고하기 위한 도시와 도시외 지역의 토지이용계획을 평가하며, 야생공간에 대한 보전 및 지속가능한 이용을 관리, 농경지 토양의 장기적인 기능을 보호하기 위한 농경지 토양관리 내용을 담고 있다.
  - 연방토양보호법은 유해한 요인으로부터의 토양의 기능을 보호하기 위하여 오염물질의 이동, 토양 생물체들의 기능, 침식, 다짐, 유전자변형생물체(GMO)의 영향, 토양에서 화학물질의 장기모니터링, 토양평가, 부지 재이용 등을 포함한 다양한 연구사업을 이행하고 있다.
- 연방토양보호법(Federal Soil Protection Act, BBodSchG)은 토양오염방지, 오염된 음부지의 조사 및 정화 뿐 아니라 지하수를 보전하고 함양하기 위한 토양의 차폐방지, 특히 도시지역에서 토지이용 변화사업에 기본적으로 이행하는 것이다.
- 사전예방의 원칙과 토양보호정책을 통하여 인간 건강과 소비자들의 효과적인 보호를 목표로 하고 있으며, 토양의 기능을 저해하는 불필요 물질을 최소화하는 것이다.
  - 토양의 생태계 기능을 보호하고 지속가능한 주민 정주를 제고하기 위한 도시와 도시외 지역의 토지이용계획을 평가하며, 야생공간에 대한 보전 및 지속가능한 이용을 관리, 농경지 토양의 장기적인 기능을 보호하기 위한 농경지 토양관리 내용을 담고 있다.
  - 유해한 요인으로부터의 토양의 기능을 보호하기 위하여 오염물질의 이동, 토양 생물체들의 기능, 침식, 다짐, 유전자변형생물체(GMO)의 영향, 토양에서 화학물질의 장기모니터링, 토양평가, 부지 재이용 등을 포함한 다양한 연구사업을 이행하고 있다.
- 연방토양보호법은 자원재생 및 폐기물에 관한 법(Kreislaufwirtschafts und Abfallgesetz), 비료법(Düngemittelgesetz), 연방입맛시온방지법(Bundes Immissionsschutzgesetz), 건축계획법 및 건축규정 등 다른 분야의 법률이 토양환경보전에 영향을 나타내지 않을 때 유해 토양변경과 Altlasten에 적용된다.
- 토지이용이나 경제적 활동에 대해서는 연방정부의 특별법에서 다루어진 이후, 연방의 토양 보호법에 다루어진다.

- 각 연방주(Environmental Ministries in the Federal States)는 오염된 부지의 등록, 목록화, 위해성 평가 및 정화를 수행한다.
  - 독일연방의 지자체는 개별 등록시스템, 평가시스템, 우선순위 결정과정 및 위해성 평가방법 등을 포함하여 Altlasten에 부여되는 문제점을 해결하기 위하여 지자체의 개별 정책으로 추진한다.
  - 연방환경청은 연방법의 제정과 정책의 집행, 감독, 기록 수집, 지침서의 제정 등, 각 주의 환경부는 규칙제정과 기금 배분을 담당한다.
  
- 독일의 토양 차폐 정도는 지난 20여년간 모니터링 되어 왔으며, 2004-2007년간 토양의 차폐율은 113ha/일(80% 주택, 20% 운송 도로)에서 이후 104ha/일로 감소되었으며, 이후 2030년까지 토양의 차폐율을 30ha/일로 낮추는 다양한 정책을 이행하고 있다 (Bundesnaturschutzgesetz-BNatSchG 2002).
  - 개발되지 않은 지역은 천혜의 자원지역임을 인식하고, 2020년까지 연방정부는 이러한 미개발 부지의 주택, 도로 목적 등으로의 개발을 30ha/일까지 제한하고 새로운 부지의 개발을 억제하고 있는 것이다.
  - 독일에서는 공간계획을 4단계의 계획(국가, 연방주, 지역, 도시)으로 구분하여 수립·이행하고 있다.
    - 공간계획법(Spatial Planning Act, Raumordnungsgesetz-ROG 1997)은 지역의 토지 이용 시행령과 계획의 틀을 제공한다.
    - 연방주(Federal States)는 계획법(Planning Act)의 틀을 마련하고 자연보전법(Nature Conservation Act)과 연계하여 도로와 건물 등의 시설 설치시 환경영향평가를 받도록 하는 등 강력하게 토양의 차폐방지 정책을 시행하고 있다.
    - 각 연방주는 여러 지역으로 구성되어 있으며, 각 지역에서는 계획지침을 마련하고 이행하고 있다.



자료: Bundesamt für Naturschutz (National Agency for Nature Protection, 2010); Prokop et al. (2011) 재인용

<그림 3-56> 독일의 평균 부지 이용 및 차폐율

- 토양의 차폐율 목표를 정하고 이행하기 위한 국가의 전략을 작성하고 이행하고 있다.
- 2002년 부지의 이용에 관한 국가의 전략인 ‘Strategy for Sustainable Development’ 를 작성하고, 2002-2010 기간 중에 <표 3-40>의 수단과 방법을 통해 토양의 차폐율을 100ha/일에서 30ha/일로 감소시키는 목표를 설정하고 있다.

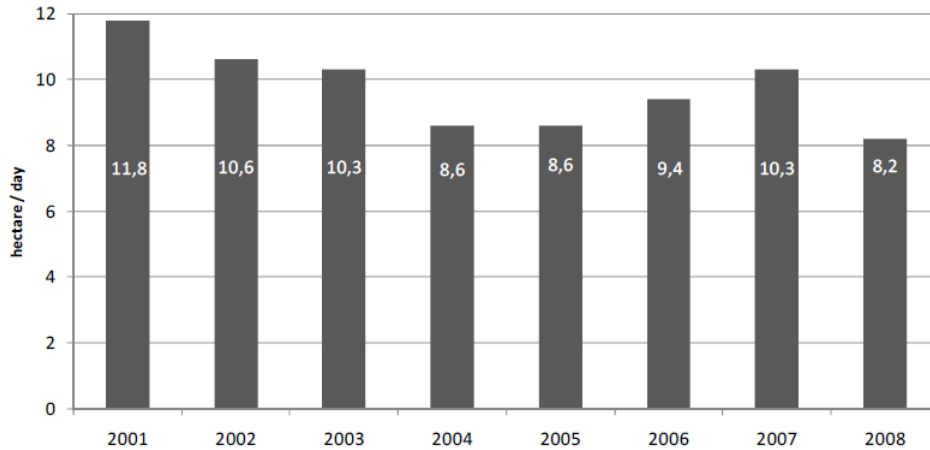
<표 3-40> 독일의 토양 차폐 방지 수단과 프로그램

구분	내용
제안 수단	- 2004년 독일의 지속가능개발위원회(German Council for Sustainable Development, CSD)는 30ha/일로 감소시킬 수 있는 방안 마련 - 이 방안에는 이행 수단, 예산, 규제, 계획 도구 등이 포함되어 있음. 이중 가장 강력한 수단은 도시의 확장과 단편화를 방지하고, 도시 내부의 개발을 지원하는 것임
특정연구	- 2006년 연구 프로그램인 REFINA(Research for the Reduction of Land Consumption and for Sustainable Land Management)를 독일 지속가능개발 국가전략(German National Strategy for Sustainable Development)으로 시행 - 이 프로그램은 다른 3개 부서와 공동으로 추진하며, 100개 프로젝트 (50여개의 공동 협력 프로젝트 포함)에 22백만 유로 지원 - 특히 도시 내부의 개발과 브라운필드의 재이용에 초점을 두고 있음
정책 평가	- 2007년 지속가능개발위원회(CSD)는 독일의 부지 이용 정책을 검토하고, 정책을 제안 - 주요 제안은 강력한 경제기구의 이행과 종합적인 토지관리개념에 대한 전국적 개념의 수립 (Fläche im Kreis “, <a href="http://www.flaeche-im-kreis.de/english_version.phtml">www.flaeche-im-kreis.de/english_version.phtml</a> ; Prokop et al. 2011 재인용)
강력한 경제적 수단의 이행	- 2009년 토양보호위원회는 독일의 토지 이용정책이 적절하지 않으며, 목표치인 ‘30ha/일’ 을 달성하기 위해 전국의 도시에서 토지 이용 및 개발에 대한 인증시스템이 필요하며, 40개 도시에서 4년간 이를 운영하기로 함

자료: Prokop et al (2011) 재인용

- 연방정부의 토양차폐 방지 정책과 더불어 16개 자치연방주에서는 토양의 이용 면적을 줄임으로써 토양의 차폐율을 줄이는 개념과 강력한 정책을 이행하기 시작하였다.
  - 16개 자치연방주 중에서 바덴뷔르템베르크(Baden-Württemberg)주와 색소니(Saxony)주의 토지 이용 정책은 변화는 가장 괄목한 변화로 평가하고 있다.
  - 바덴뷔르템베르크 (Baden-Württemberg)주의 6년간 13개 모델지역을 선정하여 새로운 녹색지대를 회피하고 기존의 마을 지역의 개발하여 토양의 차폐율을 줄이는 MELAP(Modellprojekt Eindämmung des Landschaftsverbrauchs durch Aktivierung des innerörtlichen Potenzials (Reduction of Land Take by Activating Inner Urban Development Potentials) 프로젝트를 이행했다.
    - MELAP 프로젝트는 지역의 토양 이용 면적에 대한 모니터링과 진행을 평가하며, 토양차폐의 위해에 대해 널리 알리고 이를 저감하는 공공의 인식을 확대, 지역계획 및 개발에 토양의 차폐를 저감하는 부지의 이용을 줄이도록 계획법(Planning Act)으로 규제하고 있으며, 가치 있는 토양의 보호를 위해 부지의 이용에 대해 사전에 주 정부의 승인을 받게 되어 있다. 또한 도시 내부지역의 재활성화와 브라운필드 지역의 재사용을 지역 계획의 우선으로 하고, 이들 지역의 개발 시 지원할 수 있는 특별기금을 마련하여 이를 도시 재개발 시 지원하고 있다.

- 이러한 바덴볼템베르그 주의 정책으로 인해 2001-2008년 기간 중에 정주 및 교통 시설 등에 의해 사용되는 부지의 이용이 낮아졌으며, 이후 인구의 증가와 가구의 변동이 없다.



자료: Statistical Survey Baden Württemberg (2009), Prokop et al (2011) 재인용

<그림 3-57> 바덴볼템베르그 주 정주 및 교통시설 지역을 위한 부지 이용

- Stuttgart, Mölln, Rheinhessen-Nahe, Duisburg, Nordthüringen 주에서는 순환부지이용관리 (Circular Land Use Management, Fläche im Kreis) 정책을 정주시설 부지의 확장과 도시 개발을 제한한다.
  - ‘순환부지이용관리’란 ‘회피-재이용-보상’ 원칙에 근거한 부지의 이용 정책 및 관리방법으로 기존에 이용하고 있는 부지를 최대한 이용하고 새로운 부지의 사용은 가급적 회피하여 자연 상태 그대로 두는 것이다.
  - 이 정책은 2004-2007년 기간 중에 ‘실험적인 정주 및 도시 개발’ 프로그램의 일부로 Stuttgart, Mölln, Rheinhessen-Nahe, Duisburg, Nordthüringen 주에서 시행되었으며, 도시 개발 계획 및 정책결정자들을 위한 여러 지침이 개발되었다 (Prokop et al., 2011).
- 독일 정부는 사전예방의 원칙과 토양보호정책을 통하여 인간 건강과 소비자들의 효과적인 보호를 목표로 하고 있으며, 공사에 의해 채취한 표토를 보전하며, 토양의 기능을 저해하는 불필요 물질의 최소화를 정책적으로 추진하고 있다 (Federal Ministry for the Environment, Nature Protection and Nuclear Safety, 2013).
  - 연방건설법과 연방토양보호법에 의해 채취된 표토는 지정된 구역 내에서 운반 이동될 수 있으며, 공사장 밖으로 유출을 금지한다.
  - 이 규정은 표토가 파헤쳐지는 각종 모든 건설공사에 해당하며, 단지 노천광산, 공항신축, 자동차 전용도로, 시가 전철선로 건설 제외하고 있다.

- 세계 여러 나라에서 나타나고 있는 토양의 침식, 유기물질과 영양분의 감소, 염화, 산성화 등에 대해 생물다양성협약, 기후변화협약, 사막화방지협약 등 여러 국제협약을 통한 협력과 지원을 통해 독일의 기술과 경험을 공유하고 있다.

### ③ 지하수 현황 및 정책

#### ㉞ 지하수 환경관련 이슈 및 현황 (BMUB, 2017)

- 독일의 지하수는 특정 지역을 제외하고는 지하수 양적인 문제가 없다고 보고된다.
  - 독일은 식수의 70%는 지하수에서 공급받고 있으며, 총 1,000개의 지하수체 중 약 4%만이 “좋은 양적 상태(2015년 12월 기준)” 를 달성하지 못했다.
- 독일의 지하수의 수질의 모니터링하기 위한 관측망 확충 중이다.
  - 지하수체 약 64%가 좋은 화학적 상태를 달성(2015년 12월 기준)하였다.
  - 그러나 질산염 및 식물보호제를 비롯한 산업, 농업 및 운송업에서의 확산 물질 배출 등 제한된 지역에서의 화학사고, 하수도 누출 등에 의한 지하수 오염 발생이 보고된다.
- 독일의 지하수 수질 개선 대책으로는 i) 도시인구 증가에 대한 새로운 기술을 이용한 도시 및 산업폐수 관리를 개선하고, ii) 농업에서는 광물비료의 시비 조건을 제한하거나 살충제 사용 금지하거나 많은 정보와 조언을 제공하고, iii) 광업에서는 폐수 통합처리와 침출수 수집을 위한 건설적인 조치 등을 취하는 것이다.

#### ■ 유럽연합 WFD 요구를 이행하기 위한 조치: 수역 평가 (이진용(2016)을 재구성)

- 지난 20년간 농경지에서의 질산성 질소의 농도가 지속적으로 증가하여 지하수내 질산염 오염(6%만이 기준치 이하)이 심각하게 나타났고, 지표수뿐 아니라 발트해 연안까지 수질 오염이 야기되었다.
  - 독일 정부는 질산성 질소에 의한 수질오염 문제를 해결하지 않고, 독일의 수자원법 개정 등과 같은 유럽연합의 규칙을 준수하기 위한 추가 조치를 취하지 않았다.
- 2016년 4월에 EC는 질산성 질소에 의한 수질오염 문제로 독일 정부를 상대로 사법재판소에 회부하였고, 문제 제기 이후 독일에서는 지하수와 지표수 오염이 주요 이슈로 논의되기 시작했다.

- 2016년 7월 투표를 통해, “수자원법”을 개정하였으며, 상수도 집수지역 5m 이내에서는 자갈 및 모래 채취와 농약 사용이 금지하며, 오염에 취약한 지역의 경우 상황에 따라 10m까지 확대할 수 있게 하는 새로운 법안이 발효되었다.
- 또한, 농약과 비료 사용으로 인한 문제를 해결하기 위한 새로운 법률 개정에 대한 제안을 계기로, 2018년 보트로프 도시에서 새로운 법안의 시작을 단계로 2022년부터 전역에 시행되며, 기후변화의 물 수요를 예측하여 6년마다 새로운 물공급 정책을 수립하기로 했다.
- 질산염에 의한 문제와 더불어, 플라스틱 쓰레기로 인한 지하수오염이 새로운 이슈로 논의되고, 2016년 6월 플라스틱에 대한 깨끗한 물환경 국제 컨퍼런스(International Conference on Plastics in Freshwater Environments)에서 독일을 비롯한 22개국 220명의 전문가들이 참석하여 문제 인식을 높이고 환경 정책을 논의한 바 있다.

■ **지하수를 이용한 수량 확보 문제 (이진용(2016)을 재구성)**

- 유럽연합에서 인구의 15% 정도가 물 부족 현상을 겪고, 몇몇 회원국들은 전국토가 영구적 물부족 문제에 직면했다.

㉔ **지하수환경 보전 정책 (이진용(2016)을 재구성)**

- 독일 정부의 수자원에 관한 주요 정책방향은 1) 적절한 수자원 공급, 2) 부가적 수자원 기능의 발전, 3) 복원, 4) 생태적 균형이다.
- 물에 관한 기본 법률인 연방수자원관리법의 목적은 물을 자연계의 구성 성분으로서 이해하고 사람, 동물, 식물을 위한 삶의 터전과 지속적으로 이용 가능한 자원으로 보호하는 것이다.
  - 물의 생태적 균형을 지키고 오염되거나 훼손된 곳은 복원하는 것이며 국민생활과 경제에 적절한 수자원을 공급하고 어업, 에너지공급, 휴양, 해운 등의 부가적인 수자원 기능이 지속적으로 발전하는 것이다.
- 물에 관한 기본 법률인 연방수자원관리법에 따른 지하수 관리 목표는 첫째, 수량 및 화학적 상태가 악화되는 것을 방지할 수 있도록 하고 둘째, 인간 활동으로 인한 지속적인 유해물질의 집적이 전환될 수 있도록 하고 셋째, 양호한 수량 및 화학적 상태가 유지 및 도달할 수 있도록 관리되어야 하며 지하수 취수와 확보 사이의 균형이 이루어질 수 있도록

하는 것이다.

- 독일연방정부는 유럽연합 회원국들과 유럽연합물기본지침을 통해 지하수 수질 관리 및 향상을 위해 여러 지침들이 결정되었고 노력을 기울이고 있다.
- 식수의 대부분을 지하수로부터 공급받는 독일에서는 지하수의 개발 및 이용에 대해 엄격한 규제를 하고 있으며 넓은 범위에 걸쳐 상수원보호구역을 지정하고 있다.
  - 이러한 수자원보호구역으로서의 역할을 하는 상수원보호구역 지정의 가장 큰 이유는 리스크 예방차원에서 지하수를 오염원으로부터 보호하고 폐수 및 건축물에 의해 지하수가 오염되는 것을 방지하기 위함이다.
    - 상수원보호구역을 지정하기 위해서는 각 주에서 구체적인 검증 및 절차를 거쳐 법규명령을 통해 확정했다.
    - 확정된 후 그 지역에서의 일정한 행위제한 및 수인의무가 부과되기 때문에 상수원보호구역 지정 절차 때 적극적인 주민참여가 요구된다.
- 기타 지하수 관련 주요 이슈에 따른 추진 정책은 아래와 같다.
  - 기후변화와 물공급(지하수)(Climate Change and Groundwater)
  - 재생 불가능한 지하수 관리(the management of non-renewable groundwater)
  - 지하수 보호와 위생(Groundwater Protection and Sanitation)
  - 국가 간 지하수 협력(Transboundary Groundwater Cooperation)
  - 지하수 넥서스 접근(Groundwater Nexus)

## ■ 지하수 개발.이용.공급

- 지하수의 개발과 이용에 있어, 독일의 주요 식수원이 지하수이기 때문에, 엄격한 규제가 적용된다.
  - 지하수를 오염원으로부터 보호하고, 폐수 및 건축물에 의해 지하수가 오염되는 것을 방지하기 위해 상수원보호구역을 넓은 범위에 걸쳐 지정하고 있다.
  - 베를린 주의 경우, 890 km<sup>2</sup> 면적 중 약 28%인 250 km<sup>2</sup>가 상수원보호구역으로 지정했다.
- 독일 정부는 선진국과 저개발국 사이의 물 사용의 불균형을 해소하고 전 세계 물 사용량을 조절하기 위해 물 발자국(Water Footprint)이라는 지표를 도입했다.
  - 물 발자국은 우리가 일상생활(식수, 요리, 세척 등)에서 사용하는 물과 제품(상품)이 완성될

때까지 소비되는 물의 양을 합한 총량을 말한다.

- 제품을 구매할 때 물 발자국 지표가 높으면(물 발자국이 많으면) 그만큼 제품 생산에 많은 양의 물이 사용되었음을 의미하고 물 발자국 지표가 낮으면 낮을수록 친환경적인 제품임을 의미한다.
- 이러한 물 발자국 지표 도입은 정부, 소비자, 기업에서 유용하게 활용되는데, 정부의 경우 단계별로 물이 사용된 시간과 양을 파악하고 수질에 미치는 영향을 평가할 수 있어 지속가능한 수자원관리정책을 수립할 수 있고, 소비자는 물 발자국 지표를 이용해 제품을 비교하여 친환경 제품을 구매할 수 있으며, 기업은 생산 활동 과정에서 소비되는 물의 양을 확인하여 물 절약을 통해 원가 절감을 실현할 수 있다.

### ■ 지하수 원수 관리/수량·수질 관리/보전구역 설정

- WFD는 2009년부터 2015년까지 강, 호수, 해안, 지하수 등 수역의 수질개선과 유지를 목적으로, 하천수 64%, 지하수 18%를 관리하는 것(최종적으로는 하천수 80%와 지하수 32%를 관리하는 것)을 목표로 한다.
- 수질관리로는 농업활동으로 부영양화에 따른 수질오염개선이며 이를 위해 농업오염이 심한 엘베 강, 오테르 강, 베저 강의 분수령을 중심으로 폐수처리 건설 및 보강을 실시 및 농업활동에서 유기농 농법으로 전환하면 보조금 지원 사업을 시행했다.
- 댐 건설, 운하 발달, 농장 운영 등 인간 활동으로 인해 수리형태학적 손상을 유발했고, 지류를 따라 존재하는 범람원 발생 및 생태 서식 문제 발생 등의 문제를 야기하면서, 개선 대책으로 물줄기 형태의 복원, 강기슭 서식지 및 바닥 재생, 하천 범람 방지를 위한 수로 개선 등의 과제를 수행했다.

<표 3-41> 독일의 지하수환경 관련 주요 법·제도·지침·프로그램 현황

Top Topic	주요 법·지침	관련 프로그램
- 지하수 이용·공급	- 연방수자원관리법(WHG) - 주 수법(Wassergesetz)	- 상수원보호구역 지정 - 물 발자국(WaterFootprint)
- 지하수 원수 관리 - 수량, 수질 관리 - 보전구역 설정	- 유럽연합물기본지침(WFD) - 유럽연합지하수지침(Groundwater Directive)	- 유기농법 전환 - 방향전환의원칙(Trendumkehr) - 양적균형의원칙(Quatitatives Gleichgewicht)
- 지하수 측정망 구축, 운영 - 지하수위·수질 측정	- 유럽연합물기본지침(WFD) - 유럽연합지하수지침(Groundwater Directive)	- 수량 관측(지하수의 유입 및 유출량 관리, 염분 및 화학물질 관리) - 수질 관측(감시 및 운영)
- 지하수 수질 관리 - 수질기준 설정	- 지하수보호명령 - 유럽연합물기본지침(WFD)	- 수질보호계획(Good Status) - 음용수 보존구역(Drinking Water Protected Area)
- 지하수 오염 관리	- 유럽연합지하수지침(Groundwater Directive) - 질산염지침(Nitrates Directive) - 도시폐수처리지침(Urban Wastewater Treatment Directive)	- 폐수유입에 대해 오염량과 독성에 대해 벌금 부과 - 생활하수 정화 비용 부과 - 비료 및 동물 배설물 저장고 규제
- 지하수 의존형 생태계(GDE) 관리	- 유럽연합물기본지침 공동이행전략(Common Implementation Strategy) - 유럽연합지하수지침(Groundwater Detective)	- 관측지점 및 빈도수 증가 - GENESIS (Groundwater and Dependent Ecosystems)
- 지하수-지표수 상호연계 관리	- 연방수자원관리법(WHG) - 유럽연합물기본지침(WFD) - 홍수관리지침(Floods Directive) - 조류 및 서식지지침(Birds and Habitat Directive)	- 강변여과수 개발 - 하천복원 - 환경영향평가 - 전략적 환경평가
- 지열에너지 관련	- 재생에너지법(Renewable Energy Act) - 연방광산법(Federal Mining Act) - 연방수자원관리법(WHG) - 재생에너지난방법(Erneuerbare Energie Waermegesetz)	- 지열발전축진II(Geotherm II) - 에너지패키지(Energy Package)

자료: 이진용(2016)

## (라) 영국

### ① 배경

- 북대서양과 북해 사이에 위치하며, 브리튼 제도와 아일랜드 섬의 북동부에 자리 잡은 북 아일랜드로 이뤄진 섬나라이며, 국토는 그레이트 브리튼 섬과 아일랜드 섬의 1/6을 차지

하는 북아일랜드 및 그 주위에 분포되어 있는 몇 개의 속도군(屬島群)과 해외령을 포함한다.

- 국토의 면적은 244,880km<sup>2</sup>으로 브리튼 섬의 남부 저지대로 잉글랜드의 면적은 섬 전체의 약 56.7%인 130,410km<sup>2</sup>, 스코틀랜드는 북부 고지대로 78,789km<sup>2</sup>, 서부 고지대인 웨일스는 20,758km<sup>2</sup>, 북아일랜드는 14,160km<sup>2</sup>이다.

· 국토는 목초지(permanent pastures)가 25%, 경작지 (arable land)가 10%, 산림이 10%, 그 외 19% 정도이다.

- 맨섬과 채널 제도는 왕실속령으로서 영국 정부의 국방 및 외교 관할을 받고 있다.

○ 지형적으로는 동부 해안 중앙부의 티스 강 하구와 남부 해안의 라임만을 연결하는 선을 기준으로 동남부의 저지와 북서부의 고지로 크게 구분된다.

- 대부분은 고도 1,000m 이하의 낮은 산맥 및 구릉으로 영국의 최고봉 벤네비스 산도 1,343m 정도로 높지 않다.

- 북쪽의 스코틀랜드 제도에는 피오르드 해안이 발달해 있으며, 템스 강(전체길이 350km)을 비롯하여 이 나라의 하천은 모두 짧으며 또 산지도 낮으므로 하천의 충적(沖積)작용은 크지 않다.

○ 인구는 약 6천5백만명(2016년 기준)이며, 인구밀도는 255.6인/km<sup>2</sup> 로 유럽에서도 높은 국가이다.

- 영국 면적의 50% 이상을 차지하고 잉글랜드에 인구의 80%가 거주한다.

○ 토양을 미래 세대를 위해 중요한 서비스를 제공하는 필수 자원으로 간주하고, 모든 토양을 2030년까지 지속가능하게 관리하고 토양질의 저하를 성공적으로 방지하는 것을 정부의 비전으로 마련하고 있다 (DEFRA, 2009).

- 이 비전에는 토양생물다양성의 보전과 개선을 포함한다.

## ② 토양질 현황 및 정책

○ 토양의 질은 지난 200년간 집약적 농업 생산과 산업화 과정의 오염 등으로 인하여 지속적으로 저하되어 왔으며, 향후에도 다음 세 가지 요인에 의해 토양질이 지속적으로 위협될 것으로 예상된다 (Jones, 2008).

- 첫째, 토양의 침식 문제이다.

· 매년 220만 톤의 표토가 다양한 형태의 토양침식으로 유실되며(EA, 2004), 이로 인한 경제적 손실은 매년 5,300만 파운드에 이른다고 평가하였다 (DEFRA, 2009).

- 작물 등의 생산성 감소는 9백만 파운드(EA, 2007)이며, 비와 바람에 의한 토양침식은 토양의 질뿐 아니라 물과 수상생태계를 위협하는 요인으로 보고 있다.
- 둘째, 토양의 다짐 문제이다.
  - 토양의 다짐은 사람들의 외부활동에 의해 발생하는 문제이며, 주로 농업의 생산성과 물의 토양침투를 감소시키며 토양유출수를 증가시켜 홍수의 위험도가 높아졌다.
  - 영국은 유럽연합에서 토양차폐율(156m<sup>2</sup>/인)이 가장 낮은 국가이며, 1990-2000 기간 중 연간 추가로 이용한 부지의 평균 면적은 1m<sup>2</sup>/인 이하이다. 이는 정부가 브라운필드의 재이용 정책을 강력하게 시행한 결과로 추정하고 있다.
- 셋째, 유기물질의 감소 문제이다.
  - 유기물질의 감소는 토양의 질을 떨어뜨리고 토양으로 탄소의 방출을 증가시킨다.
  - 특히, 토양의 위협요인은 기후변화에 의해 확대 및 높아질 수 있으며, 기후변화에 영향 받는 이러한 요인의 관리방법을 개선하는 것이 중요함을 강조하고 있으나, 적절한 토양 내의 유기물질 농도(예, <1% 유기탄소)에 대한 합의가 이루어진 바는 없다.

※ 영국의 토양은 100억 톤의 탄소를 저장하고 있으며, 이들 탄소의 절반은 이탄지역(peat habitat)에서 발견된다. 이탄지역에서 발생되어 대기로 방출될 수 있는 탄소의 양은 영국이 매년 방출하는 지구온난화 가스의 50배에 해당하는 양으로, 기후변화에 의해 강수의 패턴이 변화되고, 토양에서 배출되는 탄소의 양이 증가할 위험성이 있음을 인지하고 있다.
- 18세기 이후 석탄정제, 석유산업, 석면제조, 중금속 제조 등 중화학공업이 발달하였으며, 1960년대 이후 Lower Swansea valley 사건, Shipham village 사건 등 토양오염에 관한 다수의 사회적 문제가 발생하였다 (DEFRA, 2009).
  - 최근 영국 정부에서 잠재적으로 오염된 부지에 대한 자료가 없어 이에 대해 추정하는 것이 어려우나, 1990년대 조사된 자료에 의하면 약 100,000개소 이상(200,000ha)의 잠재적 오염 부지가 있으며, 이중 10% 이상은 심하게 오염되어 있을 것으로 추정된다 (DEFRA/EA, 2002; Prokpop et al., 2002).
  - 2010년 이후 조사된 EEA/EIO-NET에 의하면(van Liedekerke et al, 2014; EC/JRC European Soil Data Centre. 2011-2012), 영국의 잠재적 오염부지는 298,296개소이며 (이는 인구 1천명당 4.78개소에 해당하며) 이중에서 2,460개소가 복원되었다 (EIONET, 2011).
- 영국에서 토양의 위협요인에 의한 경제적인 피해금액을 항목별로 제시하고 있지는 않으나 상당한 경제적 손실이 발생하고 있음을 인식하고 있다.

- 매년 토양질의 저감에 따른 영국의 경제적 피해는 최소 2억 6백만 파운드에서 3억 1천5백만 파운드에 이른다 (표 3-42 참조).
- 이 비용에는 매년 약 1조 파운드에 이르는 토양오염에 의한 경제적 피해비용은 포함되어 있지 않다.

<표 3-42> 토양질의 저하에 따라 발생하는 UK의 경제적 손실<sup>1)</sup>

구분	연간 비용 (£M)
농업에 의한 토양침식 <sup>2)</sup>	45
경작에 의한 토양탄소손실 <sup>3)</sup>	82
토양구조 피해로 인한 홍수 <sup>4)</sup>	28~128
도시 배수시스템의 퇴적물 <sup>5)</sup>	56~60
합 계	206~315

주 1) 이 비용에는 매년 약 1조 파운드에 이르는 토양오염에 의한 경제적 피해비용은 포함되어 있지 않음

주 2) 토양침식은 수처리, 하천의 퇴적물 처리 비용, 작물피해금액을 포함(EA, 2007; Evans R, 1996; British Waterways, 2008)

주 3) 토양탄소손실은 처리, 방지, 행정처리, 모니터링 비용 포함(EA, 2007)

주 4) 홍수비용은 시설 피해 포함(EA, 2007)

주 5) 도시에서 퇴적물 처리 포함(Reeves)

자료: DEFRA (2009)

## ■ 토양의 오염방지

- 토양오염에 대한 토양질 저하를 방지하고 훼손된 토양을 복원하는 것은 이미 지난 수십년간 지속하여 온 영국의 주요한 토양질 보전정책이다 (DEFRA, 2009).
  - 18세기부터 시작된 산업화로 인해 석탄정제, 석유산업, 석면제조, 중금속 제조 등 중화학공업이 일찍 발달하였으며, 이로 인해 1960년대 이후 Lower Swansea valley 사건, Shipham village 사건 등 토양오염에 관한 다수의 사회적 문제가 발생했었다.
  - Environment Act 1990(환경법 1990)의 승인에 의해 1990년 이후 잉글랜드와 웨일즈의 책임당국은 법적불편조항(Statutory Nuisance Provisions)을 근거로 토양오염부지 확인을 위한 조사를 시작하였으며, 오염부지의 일부는 정화되었다.
  - 1991년 당시 영국에서 추정하고 있는 토양오염부지는 문헌에 따라 상당한 차이를 보이고 있으나 상당수의 부지가 오염되어 있으며, 그 면적도 상당함을 알 수 있다.

<표 3-43> 영국의 잠재적 오염부지 정보

부지수	면적(ha)	토지이용·형태	위치	참고연도	근거
	40,495	사용안하는 부지	England/Wales	1989	DoE
749	3,900	사용 및 0,5 ha 이하의 잠재적 오염 부지는 제외	Wales	1988	Welsh Office
2,551	8,297	사용안하는 부지	Scotland	1992	Scottish Office
68		Gasworks	London	1991	Friends of the Earth

자료: Bardos et al. (1994) 추정 오염부지

<표 3-44> 영국의 잠재적 오염부지 정보

부지수	부지 종류
20,000 - 25,000	방치된 폐기물매립지
3,000 - 5,000	가스처리시설 및 철강부지
수백개	철강부지
수만개	석유 이용 부지

자료: Ulrici (1995) 추정 오염부지

- 토양환경정책에 관련된 연방정부의 책임 부서인 DEFRA(Department of Food, Environment and Regional Affair)는 1995년 「환경법(Environment Act 1990)」에 토양보호에 관한 새로운 부분(Part IIA)을 포함한 「환경법 1995 (Environment Act of 1995)」를 마련하고 인간에 의해 발생한 토양오염에 대한 정책을 강력하게 추진해왔다.
  - 환경법 1995 Part IIA에는 법의 목적, 정책의 접근방향, 법의 역할, 관련용어의 정의, 규제기관의 의무, 토양오염지역의 조사 및 정화 메카니즘, 토양오염지역의 책임 등에 대해 기술하고 있다.
  - 환경법 1995 Part IIA를 이행하기 위해 토양오염지역의 조사 및 정화절차, 지침 등 (DETR Circular2/2000 (Statutory Guidance)이 수립되어 있으며, 토양보전의 목표, 전략 및 정책접근 방법 등이 제시되었다.
  - 환경법1995Part IIA는 2개의 의회명령(DETR Circular2/2000Annex5에 기재), Pollution Prevention & Control Regulations2000 (SI2000/1973), Contaminated Land (England) (Amendment) Regulations2001 (SI 20001/663)와 연계하여 이행하는 것이다.

- 토양의 질은 부지의 이용 용도에 적합한 상태로 유지해야 하는 ‘이용목적 부합의 원칙 (Suitable-for-Use Principle)’ 에 의거하여 정책을 수립하고 이행하고 있다.
  - 토양환경정책의 정책목표는 현재 및 미래에 이용하고자 하는 토양의 이용용도에 적합한 토양의 기능을 회복시키는 것이다.
  - 정책목표를 달성하기 위한 추진전략으로 i) 미래 토양오염의 예방, ii) 예방의 원칙과 관련된 지속가능한 부지의 개발, iii) 오염부지의 정화 시 현재와 미래의 토지 이용 목적에 적합하도록 토양의 질을 유지할 수 있도록 오염토양을 정화하는 것이다.
- 환경법1995 Part IIA외에 환경법1990 Part I, 폐기물관리법, 수질법, 수자원법1991(Water Resources Act 1991), 도시계획법1990(Town and County Planning Act of 1990) 등 토양오염과 관련된 5개의 성문법과 관습법이 있다.
  - 관습법은 토양오염으로 인하여 제3자가 소유하고 있는 부지의 피해를 입은 경우, 소유자는 피해자에게 여러 가지 법적 배상을 제공해야 할 근거를 제공한다.
- 최근에는 토양의 유기물질 함량을 높이고 비료의 사용을 줄이며, 매립지의 물질을 재활용하여 자연 상태로 순환시키는 정책을 다양한 방향에서 추진되고 있다.
  - 특히 EU와 EC 등에서는 폐기물 저감과 대기오염물질의 저감 정책을 통해 토양의 오염감소에 노력을 기울이고 있다.

## ■ 농경지의 토양의 질 보전

- 이해당사들(농부, 임업인, 부지의 관리자 등)과의 협력을 위해 CAP 프로그램(Common Agricultural Policy Cross Compliance)의 개선, 환경지침(Environmental Stewardship), 영국 유역민감농장이니셔티브(England Catchment Sensitive Farming Delivery Initiative), 새로운 ‘Code of Good Agricultural Practice’ 마련 등을 통해 토양의 질 저하 방지를 추진하고 있다 (DEFRA, 2009).
  - Cross compliance는 토양의 질을 보호하고 관리하기 위한 Common Agricultural Policy(CAP)를 이행하기 위한 일련의 표준적인 요구사항으로, 농부들에게 토양의 평가를 요구하며 문제점을 확인하고, 문제점을 해결하기 위한 적절한 이행을 요구하고 있다.
    - 이에 대한 토양보호검토(Soil Protection Review)를 2010년에 제공하였다.
  - Environmental Stewardship은 환경 친화적 농업을 수행하는 농부에게 기금을 지불한다.
    - 이 지침에는 토양의 침식을 감소하기 위한 방법을 농부가 직접 선택하도록 되어 있다.

- 물 정책 규정인 ‘Code of Good Agricultural Practice’ 의 목적은 정부의 제도를 실행하는 데 필요한 설명과 최적농업방법(agricultural best practice)을 실행하는 자문을 제공한다.
- 2007년부터는 매년 5백만 파운드를 투자하여 토양과 물을 관리 연구를 수행하고, 이를 통해 토양의 기능 손실에 대한 이해와 문제점을 해결하기 위한 다양한 방법을 제공한다.
- 토양의 질 저하에 관련된 기존의 지식과 정보를 정리하고 축적하여 토양 유기물질을 보전하고 토양의 질을 유지하는 방법에 대한 교육과 홍보를 수행했다.

### ■ 토양의 탄소저장 보호 및 제고

- 영국 정부는 토양의 탄소를 보호하기 위한 강력한 정책을 수립하고 수단을 개발해왔다 (박&최, 2012).
- 과학적 증거의 축적과 토양탄소를 보전하고 토양의 탄소가 대기에 방출됨으로써 사회에 미치는 비용에 대한 이익·비용 분석과 과학기술, 탄소의 지하저장기술, 이탄의 보전기술 등의 지속적인 연구 및 개발 등이 이에 해당한다.
- 영국 토양은 유기물질의 형태로 수십억 톤의 탄소를 저장하고 있으며, 영국 정부는 탄소가 토양에서 대기로 방출되지 않도록 하는 것은 기후변화를 조절하는 매우 중요한 전략임을 인식해왔다.
  - 영국의 토양에 있는 모든 탄소가 대기 중에 방출되면 367억 톤의 CO<sub>2</sub>가 생성되며, 이는 2007년 UK가 방출한 모든 지구온난화 가스의 최소 57배에 해당하는 양임. 이러한 토양의 탄소방출을 방지하는 것이 영국 정책에서 가장 높은 우선순위에 있다 (HM Government, 2009).
- 영국 토양 중의 탄소는 이탄지역의 토양(peat soil)에 저장되어 있으며, 이탄지역의 탄소를 보호하고 유기탄소가 이탄형태를 유지하기 위한 정부의 강력한 수단이 시행되었다.
  - 이탄을 보호하기 위한 파트너십 프로젝트(Partnership Project on Peat)가 2008년부터 시행되었다.
    - DEFRA와 관련 정부 조직들의 행정시스템을 함께하기 위한 법령 마련을 추진하고 있다.

### ■ 변화하는 기후에 대한 토양의 회복력 구축

- 변화하는 기후에 따른 토양의 변화에 대한 이해가 필요하며, 이에 대응하기 위한 정책과 이행 수단의 마련을 추진 중이다.

- 우선은 기후변화가 토양에 미치는 생물·물리·화학적 변화를 예측할 수 있는 모델 개발을 지속적으로 지원하는 것이다 (DEFRA, 2009).

## ■ 건축물과 도로 등의 건설과 개발로부터의 토양 보호

- 영국은 도시지역의 지역계획 및 건설 프로그램을 통해 유럽에서 가장 강력한 도시 확장 방지 정책을 집행하고 있으며, 이를 통해 도시지역과 국토의 차폐율을 조정함으로써 토양을 보전하고자 하였다.
  - 이 정책은 지역의 주민과 지자체 정부와 협력을 통해 이루어질 수 있음을 인식하고 있으며, 2010년부터 중앙과 지방이 함께 할 수 있는 정책을 수립하여 이행하고 있다.
    - 토양은 도시지역에서 도시에 존재하는 여러 생태계와 물의 배수시스템을 지원하고, 지역 사회의 녹색공간을 제공하는 터전으로 도시지역의 건설과 건축물에 대한 관리가 적절하게 이루어지지 않을 시 토양의 주요한 생태적 기능은 사라지게 된다.
  - 도시를 둘러싸고 있는 그린벨트(Green Belt) 정책을 통해, 도시의 확장을 막고 도시 인근지역의 차폐를 막아 토양의 기능을 보호하고자 하였다.
    - 잉글랜드 지역에서 그린벨트는 12%에 달하며, 이 지역은 지역정책지침(Planning Policy Guidance No 2, adopted in 1995 and amended in 2001)에 의해 토양의 기능이 보호되고 있다.
  - 압축된 토양의 경우, 기계 및 설비 등에 의한 토양의 압축을 줄이고 토양의 적정 수분을 유지하며, 식물이 성장할 수 있는 환경조건을 유지할 수 있는 등의 토양관리지침과 기술을 마련하였다 (Hanza & Anderson, 2005).
- 건설과정에서 발생할 수 있는 토양오염과 불필요한 토양의 다짐을 방지하기 위해 DEFRA는 Department of Business, Innovation and Skills(BIS)와 Waste and Resources Action Plan(WRAP)과 협력하여 건설현장에서의 토양의 사용을 위한 ‘Construction Code of Practice for the Sustainable Use of Soils on Construction Sites(2009)’를 마련하였으며, 코드(Codes)의 이행을 권장하고 있다 (DEFRA, 2009).
- 브라운필드의 재이용을 통해 새로운 지역을 개발을 억제한다.
  - 잉글랜드는 PPS3(Planning Policy Statement 3)를 통해 브라운필드를 적극 개발하고 새로운 지역의 도시개발을 억제한다.

## ■ 연구와 모니터링, 협력

- DEFRA는 협력조직에 다양하고 광범위한 연구를 지원하고 있다.
  - 토양의 모니터링은 토양의 변화와 상태를 확인하며, 정부의 정책을 평가하며 효율적인 정부의 정책 집행을 이끌어 내기 위한 수단으로 1978년 이후 토양의 구조변화와 질의 변화를 조사한 바 있다.
  - 향후에도 이 조사는 지속할 것이며, 조사에 새로운 항목, 특히 생물학적 항목의 추가를 고려하고 있다.
- 토양의 질을 보전하고 관리하기 위해 DEFRA는 협력관계를 강화하고, 토양의 정부정책전략을 지원하고 평가하는 것이다.
  - 정책이행을 모니터링 하는 DEFRA의 ‘Soil Advisory Forum’의 멤버십을 확대했다.
    - 토양의 생태계와 생물다양성을 보전하는 전략은 영국(England)을 대상으로 하고 있으며, 영국과 유사한 경험을 가진 UK 다른 행정부와 협력과 더불어 전략 수립을 지원하고 있다.
  - 유럽차원에서 토양보전에 대한 경험과 정책, 정책이행수단의 지식과 경험공유를 촉진해왔다.
    - 유럽 국가들과의 토양보전에 관한 전략은 2006년 9월에 발간된 EU의 ‘Thematic Strategy for Soil Protection’에 반영되었다.

## ③ 지하수 현황 및 정책

### ㉞ 지하수 환경관련 이슈 및 현황 (김규범(2016) 재구성)

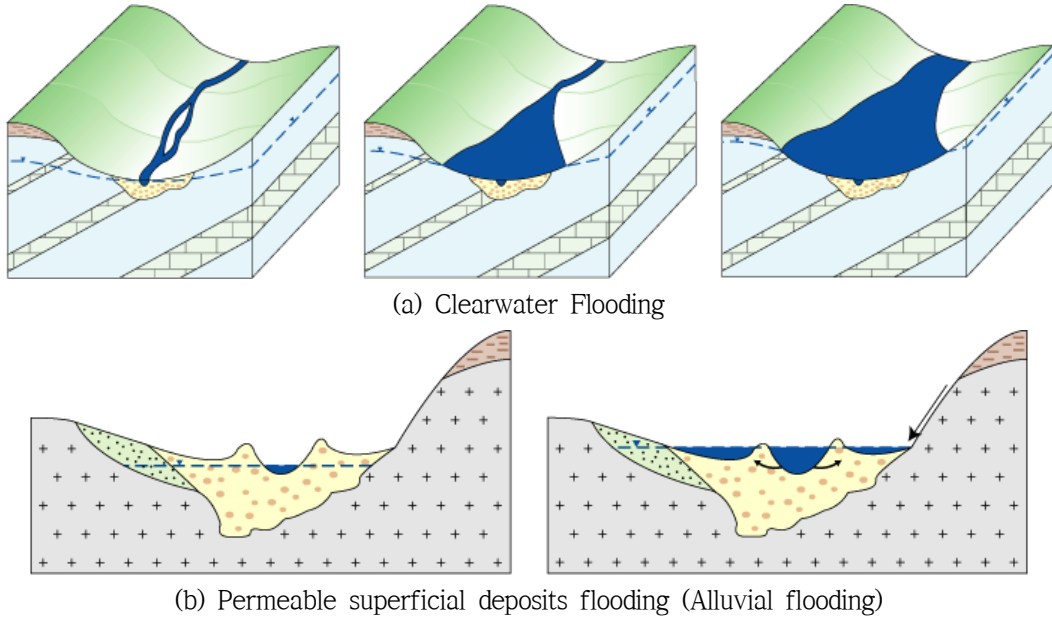
- 영국에서는 상하수도 및 지하수를 포함한 모든 물 관리를 일원화하여 관리하고 있다.
- 영국은 2000년대 초부터 시작된 기후변화와 관련한 사항들이 주로 포함되는데, 2012년 10월에 농업용수와 식수를 공급하는 하천이 고갈되면서, 남동부에서 시작된 가뭄 피해는 셰필드, 돈캐스터, 체스터필드 등 중부권으로 계속 확산되어 가뭄 피해가 급증하였으며, 이와 관련한 지하수 개발을 통한 용수 확보가 주요 이슈로 대두되었다.
- 영국은 EU 회원국들과 마찬가지로 지하수 수량·수질 변화에 중점적으로 다뤄지고 있으며, 특히 지하수 수질 오염 중 질산염 관리와 지하수 상승에 의한 지하수홍수(Groundwater Flooding) 개념의 도입과 지하수홍수로 인한 토양수분 증가, 식생의 변화, 작물재배의 영향 등에 대해 다루고 있다.

- 기후변화로 인한, 가뭄-하천고갈-농업용수·식수 부족-지하수 개발-지하수위 강하 영향
  - 기후변화로 인한 해안지역의 지형변화-해수면의 변화-해안침수·연안침식-해안선 관리
  - 지하수 수질 오염: 질산염 취약 지역(NVZ) 설정
  - 지하수 상승에 의한 지하수 홍수(Groundwater Flooding)
  - 지열에너지: 주입수의 수질 및 온도에 의한 지중 생태계 영향
- 영국의 경우 지하수로 인한 홍수(침수) 문제가 최근 이슈로 부각되는데, 홍수를 야기하는 지층은 주로 초크층과 사암층에서 문제가 발생되고 있다.
- 런던은 지난 수백년간 지하수 양수로 인하여 하강된 지하수위가 지하수 취수량이 감소함에 따라 상승하게 되어 나타나는 지반 지층의 이완 및 취약성이 증대되는 현상이 발생했다.
- 남서 런던의 경우 최근에 1년에 5 m 정도의 지하수위 강하를 유지시킴으로써 상승에 의한 문제를 해소하고 있다.

#### ■ 지하수 홍수(Groundwater Flooding) (김규범(2016) 재구성)

- 지하수 홍수는 하천의 범람과 함께 주요 이슈로 부각되었는데, 하천의 경우에는 2014년 2월에 겨울 홍수로 인하여 템즈강이 범람한 바 있으며, 영국 남부지방 5천 가구 이상이 침수 피해를 겪은 바 있다.
- 지하수 홍수는 초크층내 부존되어 있는 지하수가 추가적인 강우 등에 의하여 지표로 노출되면서 장기간 동안 지표 침수를 야기하는 특성을 갖는 것을 말한다.
- 지하수 홍수를 Clearwater flooding과 Alluvial flooding로 분류하여 대응 대책을 마련 해왔다 (그림 3-58 참조).
- Clearwater Flooding: unconfined permeable bedrock 또는 permeable bedrock 상부에 모래·자갈 등 투수성 높은 퇴적물이 있는 지역에서 발생하며, 아주 많은 지하수 함양이 일어나고 일정 기간이 지난 후 지하수면이 평균수위 이상으로 상승하여 지표면과 만나는 곳에서 유출되어 발생하며, 대부분 지하수면 변동폭이 큰 chalk/fractured limestone 대수층에서 발생한다.
    - 매우 긴 기간 동안 홍수가 유지
  - Superficial deposits flooding (Alluvial flooding): 하천과 인접한 지역에서 impermeable bedrock 위에 강모래·자갈 등 투수성 퇴적물이 있는 river valley에서 발생되는데, 하천수위가 높을 때 하천수가 주변 투수성퇴적물의 지하수면을 높게 하여 발생한다.

- 상대적으로 짧은 지속기간 유지되는 특성



자료: BGS(2016: 김규범, 2016에서 재인용)

<그림 3-58> 영국의 지하수홍수(Groundwater Flooding)의 분류 및 개념도



버크셔 콤프턴 지역 지하수홍수(2001.1)



옥스포드 지역의 지하수 홍수 사례(2007.1)

자료: 김규범(2016)

<그림 3-59> 영국의 지하수홍수(Groundwater Flooding) 사례

### ■ 가뭄과 지하수 (김규범(2016) 재구성)

- 제1차 세계대전 이전 150년간 동절기는 일반적으로 건조하였으며, 지하수위는 지역의 물 공급에 위협이 되는 수준으로 낮게 유지되었다.

- 최근의 가뭄은 1932~34 및 1940년대에 발생하였고 최악의 가뭄은 1975/76년에 발생했다.
  - 이 당시의 강우량은 1766년 이후 최저였으며, 지하수위는 매우 낮아 이로 인한 하천 유량도 극도로 악화되었다.
  - 테임즈 강의 경우에 Teddington 보의 공급 중단이라는 극한 상황을 겪은바 있다.
- 20세기 후반에 들면서 동절기의 작은 강우량은 가뭄을 보다 활성화시켰는데, 1988-1992 및 1995-1997 기간 동안은 이전의 약 100년 동안과 비교하여 가장 낮은 지하수위를 보였다.
  - 낮아진 지하수위는 연계된 하천의 고갈도 유발되었다.
- 잉글랜드 및 웨일즈 지역의 경우에 2004-2006년 기간 동안 장기간의 가뭄이 발생했다.

### ■ 에너지 분야에서의 지하수 활용 (김규범(2016) 재구성)

- 밀폐형 지열 뿐 아니라 개방형 지열을 활용한 에너지 활용 시스템의 활용이 확대되고 있으나, 주입수의 환경적 위험성에 따른 영향 등에 대한 검토가 이루어지고 있으며, 이와 같은 주입수의 수질 및 온도 영향이 지중 생태계에 미치는 영향 등도 주요 이슈로 대두되고 있다.

### ■ 지하수 활용의 지속성과 생태계 보호 (김규범(2016) 재구성)

- 환경을 보전하기 위한 다양한 조치를 적용함에도 불구하고 물 수요 증가는 다양한 환경적 문제 야기: 물 공급 문제를 야기한다.
  - 가정용 물 소비는 물 사용량이 큰 주방 가전제품의 사용이 증가하면서 지난 30년 동안 70% 증가했다.
  - 인구는 2021년에 2001년에 비하여 11% 증가할 것으로 예상되는데 전반적인 물 수요도 증가하고 있으며 향후 지속될 전망이다.
  - 영국의 남동쪽에 주거가 집중되는 현상을 고려할 때 이 지역에서의 지하수에 대한 의존이 물 공급에 영향이 대두되고 있다.
- 지하수 수질 및 공급수 수질 문제
  - 과거에 지하수는 수질에 문제가 없었으나, 1940년대 이후 농업활동 증가로 인한 질산염의 증가로 살충제, 도로, 철도, 제초제, 석유 누출, 폐놀 및 염소화 탄화수소의 파이프 라인 유출 등 문제에 직면하면서 오염원 및 수질 문제는 지하수의 지속적 활용에 대한 이슈로 대두되고 있다.

## ㉔ 지하수환경 보전 정책

### ■ 질산염민감지역(Nitrate Sensitive Area; NSA) 설정을 통한 질산염 관리 (이수재, 2015)

- 영국은 EC의 Nitrate Directive 상의 질산염취약지구(NVZs)가 정의되기 전부터, 질산염의 오염확산 방지를 위해 시행되었던 보호구역제도이다.
- NSA 먹는물 수원의 nitrate농도가 50 mg/l를 넘거나 넘을 위험에 있는 지역을 대상으로 하며, 대책을 따르는 농민들에게는 보상을 해주는 방식이다.
  - NVZ와는 달리 보호구역 내에 적용된 것은 자발적인 것이며, 1990년 10개 지역에서 시범사업을 시행한 후에 최종 32개 지역으로 늘어났으나 1998년 이후부터는 지역을 새롭게 선정하지 않았다.
  - 그 이유는 이들 지역들이 모두 1996년 EC Nitrate Directive에 의해 설정된 NVZ에 속했기 때문이다.
- NSA의 대책은 기본계획(Basic Scheme)과 특별계획(Premium Scheme)의 2단계로 구분: 기본계획은 기존의 농업활동의 틀 안에서 질산염 용출을 줄이는 것이며, 특별계획은 보다 획기적인 변화를 요구하는 것으로 농민들과 5년 단위로 계획을 하는 방식으로 대책이 시행된다.
  - Basic Scheme
    - 유기 무기 비료를 경제적 최적 수준 이하로 살포하도록 하고 살포시기 제한
    - 추수가 끝나는 가을에는 토지가 나대지가 되지 않도록 작물로 덮도록 하고, 목초지에서 쟁기질 제한. 순환경작으로 휴경 시에는 토지를 초지상태로 보존
    - hedgerow(울타리; 그림 3-14)와 숲의 보전
    - 돈사, 계사 등과 같은 실내축사에 대하여 분뇨관리 구체적인 계획 수립
  - Premium Scheme: 특별계획에는 4개의 옵션으로 적용
    - 경작지(arable land)를 초지, 무시비(施肥), 비목초지로 바꾸기
    - 경작지를 시비하지 않는 초지로 바꾸기,
    - 경작지를 제한시비와 조건부초지로 바꾸기
    - 경작지를 초지와 숲으로 바꾸기
- NSA로 설정된 일부지역은 성공적이었고 광범위한 환경적 실익이 있었다.
  - EC Nitrate Directive에 의해 설정되는 NVZ에서의 대책을 시행하는 것에 대하여는 NSA대책

과는 달리 보상이 없다.

## ■ 홍수(지하수 홍수 포함) 대응 정책 (김규범(2016)을 재구성)

- 영국의 템즈강 하구 관리계획(Thames Estuary 2100, TE2100)에 따라, 수해 방지를 위하여 ‘3단계 홍수위험평가제도’를 시행했다 (채여라, 2012).
  - 광역 차원에서는 광역홍수위험평가(RFRA: Regional Flood Risk Appraisal)를, 도시 차원에서는 전략적 홍수위험평가(SFRA: Strategic Flood Risk Assessment), 개발단위에서는 홍수위험평가(FRA: Site-specific Flood Risk Assessment)를 각각 실시하였다.
  - 홍수구역(Flood Zone) 구분을 통한 개발사업 및 개발행위의 순차적 제어(Sequential Test)를 실시하여 홍수평가에 따라 홍수구역이 구분되면 홍수구역, 홍수 위험도에 따라 개발 우선 순위, 허용되는 용도·시설, 허가 조건 등을 부여하였다.
  - 영국의 배수 체계는 홍수관리를 위한 것으로, 하천 및 하수도 시설을 중심으로 구조적 대책이 주였으나 최근에는 기존 구조적인 대책에서 더 나아가 입지, 토지이용, 건축물, 대피체계 등 보다 종합적인 대책을 수립 및 운영 중이다.
- 영국의 계획정책지침(Planning Policy Statement) 25에 따라 홍수위험 관리상의 기후변화를 고려하기 위해 강우기준을 상향 조정하였다.
- 2008년 런던플랜(London Plan)에서는 지속적인 홍수위험관리 정책을 마련하고, 전략적 홍수위험평가를 실시하여 개발에 적합한 입지와 홍수위험관리가 필요한 입지를 식별 및 관리한다.
- 새로운 홍수터의 창출, 오픈 스페이스 등 자연적인 홍수터의 보전과 같은 홍수관리 정책을 추진 중이다.
- 지하수 홍수는 이와 같은 홍수 관리 정책에 관여하고 있는데, the Flood & Water Management Act에서 지하수 홍수에 대한 사항을 포함하고 있으며, 잉글랜드와 웨일즈 지역에 적용이 되며, 유럽 연합의 홍수 지침에 근거하여 지하수 범람의 위험 관리에 대한 사항을 규정하고 있다.
  - 지하수 홍수에 대한 대책은 다음과 같다.
    - 1) 홍수터(floodplain) 내 개발제한
    - 2) 지역적인 지하수 홍수 경보
    - 3) 지하수 양수(pumping) 관리

- 4) 건물 지하층에 대한 방수처리: 건물소유주 비용 발생
  - 5) 지하수흐름의 제어 (barrier to flow) : 효과가 있을지 의문이며 환경에 대한 악영향 및 비싼 비용 발생
  - 6) 홍수 (flood water)를 빠른 시간 내에 계곡을 통과시켜 이동시키는 방안
- 또한 지하수 홍수에 대한 mechanism 규명, 지하수 홍수의 모델링 및 예측, 지하수 홍수 취약성도 등을 작성하였다.
- British Geological Survey Centre for Ecology and Hydrology에서는 지하수 홍수 연구를 2000년대 초반 Brighton 지역 및 Somme valley(프랑스)에서 홍수 피해가 발생하면서 시작되었다.

#### ■ 가뭄 대응 정책으로서 지하수 활용 (김규범(2016)을 재구성)

- 영국환경청은 가뭄과 관련한 대책으로서 지표수와 지하수의 연계적 접근을 추진하고 있다.
  - 환경청은 다양한 데이터(강우계, 유량계 네트워크, 지하수위 감시 네트워크, 전국적인 생태 환경조사 네트워크, 지표수 혹은 지하수질 감시 네트워크, 저수량 데이터 등)와 가뭄 현황 등을 바탕으로 전문가적 판단을 통하여 지역별 가뭄상황을 판단했다.
  - 각 가뭄상황 변화에 따라 환경청, 상수도 회사, 지방정부, 국방부 직할부대 및 관련 기관들과 협력하여 가뭄을 대처하고,
  - 가뭄 발생 시 안정적인 물 공급을 유지 하고자, 효율적인 가뭄 관리를 위해 단기 및 장기적인 가뭄 계획을 수립하였다.
  - 세부적인 가뭄 관리에 대한 책임기관으로는 상수도 회사, 환경청, 정부, 기타(기관 및 그룹) 등으로 구분하여 역할을 부여하고 있다.

## ■ 해안선 관리 (김규범(2016)을 재구성)

- 영국의 해안선관리계획(Shoreline Management Plan, SMP)은 전체 연안의 물리적 과정을 광역적 단위에서 평가하고 침수, 침식, 등 연안지역에서 발생할 수 있는 위험을 관리하기 위한 비 법정계획이다 (채여라, 2012).
  - UKCCP의 분야별 적응정책 중 하나인 ‘홍수 및 연안침식 관리 수단 작성’ 이 구체화된 것으로 환경식량농촌부에서 작성한 해안선관리계획지침에 따라 수립되었다.
  - 2006년에 수립된 개정 지침에서는 기후변화와 해수면 상승이 연안지역에 주는 영향을 강조 하면서 장기간(50~100년)의 연안지역 변화를 고려한 계획을 수립토록 하였다.

## ■ 영국의 지하수환경 관련 법제도·지침·프로그램 (김규범(2016)을 재구성)

- 수자원법: 물에 대한 기본법적 성격으로서 다양한 일반적인 사항을 정하고 있다.
  - 물 공급, 사용 및 하수처리 등 에 대한 허가 사항을 규정
  - 물 공급 및 처리 시설의 계획 및 설치에 대한 사항을 규정
  - 물 산업의 활성화 및 의무 등에 대하여 규정
- 지하수법 (Groundwater regulations 2009): 지하수 개발에 따른 인허가 및 오염원관리에 대한 사항을 규정하고 있다.
- 홍수 및 물 관리법(Flood and Water Management Act, 2010): 홍수, 위험, 위험도 관리 등 에 대하여 정의하고 있다.
  - 해안 침식을 포함한 내륙 홍수에 대하여 각 지역별 관리 전략 수립 등
  - 지역별 Flood and Coastal Committee의 구성 및 운영 규정
- LOCAR: 영국은 저지대 홍수 피해가 매우 큰 이슈로 대두되고 있는데, 저지대 물 관리를 위한 체계적인 연구를 수행하는 프로젝트이다.
  - DEFRA(Dep. for Environment Food and Rural Affairs) 및 NERC(Natural Environment Research Council) 자금을 활용하여 연구를 수행 중이다.
  - 약 75명의 과학자가 참여하고 있으며, 다공질 암석 내에서 발생하는 수문 순환 및 생태에 대하여 연구하고 있다.
    - 현장 조사, 실내 실험 및 모델링 등을 통하여 투수성 지반이 물에 어떻게 작용하는지와 현재 및 미래의 투수성 저지대 구역의 관리에 필요한 과학적 필요사항을 제공한다.

- DEFRA의 지하수 관련 업무: 홍수 예정보 및 지하수 침수 위험도에 대한 실시간 정보를 제공하고 있다.
- FCERM(Flood and Coastal Erosion Risk Management)의 운영: 해안 및 홍수의 발생과정을 이해하고 평가하는 것을 목적으로 프로그램이 개발되었으며, 지속 가능한 방법으로 해안 침식 및 홍수 관련 자산을 보호하며 효과적으로 홍수 이벤트를 관리하는 것을 목적으로 한다.
- GARDIT 그룹의 운영: GARDIT는 런던의 지하수 상승에 대응하기 위한 연구 그룹을 운영하고 있다.
  - 19세기까지 런던 지하수위가 90 m까지 강하하였으나, 20세기 들면서 변화가 발생했고,
  - 1960년대에 최대 취수가 이루어졌으나 이후 취수량이 감소하면서 1989년 CIRIA(Construction Industry Research and Information Association)의 보고에 의하면, 깊은 기초에 문제가 발생하게 되었고 지하수위 상승이 통제가 어려운 상태에 이르게 되었음을 공식화하여 인정하였다.
  - 런던 시청, 수도회사, 정부, 보험연합, 통신사 등이 GARDIT를 구성하여 5년의 계획을 수립하게 되었으며, 이후 지하수위 강하를 위한 정책을 실시하였다.

<표 3-45> 영국의 지하수환경 관련 법제도·지침·프로그램

Top Topic	주요 법·지침	관련 프로그램
- 지하수 이용·공급	- 지하수법(Groundwater regulations 2009)	- 지하수 수질 모니터링 및 시추공 네트워크 형성 - EU 통합 오염 방지 및 통제 지침
- 지하수 원수 관리 - 수량, 수질 관리 - 보전구역 설정	- 홍수 및 물 관리법(Flood and Water Management Act, 2010) - 질산업 오염 방지 규정	- 홍수 위험 관리 행동 지침 - 지하수 수질 보호를 위한 보호 구역 설정
- 지하수 측정망 구축, 운영 - 지하수위·수질 측정	- 수자원 법 (2014)	- 지하수 수질 모니터링 및 시추공 네트워크 형성
- 지하수 수질 관리 - 수질기준 설정		
- 지하수 상승 수위 관리		- GARDIT(대수층 연구개발 및 조사) - FCERM(Flood and Coastal Erosion Risk Management)

자료: 김규범(2016)

## (마) 네덜란드

### ① 배경

- 네덜란드(왕국)의 면적은 37,330km<sup>2</sup>로 한반도의 약 37% 정도이나 국토의 대부분이 높낮이가 없는 평야지대로 농경지가 국토의 53%를 차지한다.
- 인구는 2015년 현재 16,854천명으로 인구밀도는 402인/km<sup>2</sup>로 EU 국가중 가장 높으며, 12개의 자치 province로 구성된다.
- 국토의 25%가 해수면보다 낮은 지역에 해당한다.

### ② 토양질 현황 및 정책

- 토양보호에 대한 정부의 정책은 1970년대 중반 네덜란드 남부 Lekkerkerk시 신흥주택지 부지의 오염 사건을 계기로 토양오염방지에 대한 네덜란드의 정책과 법체계가 급진적으로 발전했다 (Page, 1997).
  - 네덜란드 서부에 위치한 Lekkerkerk시에 1970년대 개발자들이 268개 주택을 건설하는 과정에 부지의 토양오염이 확인되었다 (Kingsburry and Bingham, 1992).
    - 해수면보다 낮으며 지하수층이 높은 신흥주택지 건설부지 지역은 1m 정도의 유해폐기물이 혼재된 건설토로 성토한 지역으로, 건설토에는 페인트물질, 페플라스틱물질, 프린트 잉크 등 독성물질이 포함되어 있음이 후에 밝혀졌으며, 중금속과 유기화학물질 등이 지표수, 토양, 건설된 집의 지하에서 조사되고, 화학물질이 LDPE(Low density polyethylene) 물 공급관으로 확산되어 있음이 발견되었다.
    - 이 지역의 대기에서 toluene, xylene 등이 1000ppm 수준으로 조사되었다.
  - 1980년 봄 정부는 모든 거주자들은 대피시키고 모든 오염물질을 제거하는 복원을 시행했다.
    - 당시 153,000MT(168,654 ton)의 오염토양이 소각 처리되었는데, 이 지역의 복원 비용은 1억5천만 길더(약 6천5백만 US \$)가 소요되었다.
    - 오염부지의 복원 이후 이 지역은 거주 지역으로 재이용되었다.
- 1983년 네덜란드 중앙정부인 ‘주택, 지역계획 및 환경부 (VROM, Ministrie Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Mileiubeheer: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment)’ 는 오염지역의 복원에 대해 ‘Leidraad Bodembescherming (Soil Cleanup Guidance Note, SCGN, 토양복원지침)’ 을 마련 (The Netherlands Ministry

of Housing, Physical Planning, and Environment, 1983)하고 지방정부는 이를 채택하고 공식적으로 사용하였다 (Page, 1997).

- 이 지침은 토양오염지역을 3단계인 i) harmful contamination, ii) urgent contamination, iii) post-cleanup multifunctionality 으로 구분하고 이로부터 Dutch List인 A, B, C 기준을 마련했다.

- A level : 어떠한 행위가 필요하지 않은 참고수준
- B level : 이 지역에서 추가적인 오염평가가 필요한 수준
- C level : 복원이 요구되거나 토지를 이용할 수 없는 수준

- 이 지침에 제시된 A, B, C 수치는 토양과 지하수에 따라 다르게 적용된다.

- 이 지침에는 중금속(metals), 무기물질(inorganic constituents), 방향족물질(aromatic compounds), 다고리수산화탄소물(polycyclic hydrocarbons), 염화수산화물(chlorinated hydrocarbons, 독성농약물질(toxic pesticide products) 등 오염물질을 포함하고 있다.

- 당시 Dutch list에 제시된 오염물질의 수준은 서로 다른 기준으로 A, B, C 수치는 토지사용에 따른 오염지역의 부지 특이적 정보와 수리조건과 연계되어 사용하도록 되어 있다.

- A value : 네덜란드 토양에서의 자연배경농도 또는 자연적으로 발생하지 않는 물질의 감지 수준 농도(detection level). 지하수의 경우 네덜란드와 EC에서 제시된 마실 물로서 지하수를 보호하기 위한 오염물질의 기준에 해당한다.
- B value : A와 C 수치의 중간 수치로 볼 수 있다.
- C value : 오염물질의 독성과 지속성에 근거한 오염물질의 농도로 복원이 필요한 오염물질의 농도를 나타낸다.

- 네덜란드 정부는 당시 Dutch list의 A, B, C 기준이 토지사용에 따른 오염지역의 부지 특이적 정보와 수리조건과 연계되어 사용하도록 되어 있음에 따른 문제점으로 인해, 이 수치를 부지의 평가 기준으로 사용하고, 오염된 부지의 정화기준으로 사용하지 않았다.

- 정부는 오염지역을 A level 이하로 정화기준을 세우지 않았다 (van Arheim, 1994).
- 문제점은 Dutch list의 A, B, C 기준 수치는 정량적인 반면에, 토지이용 및 수리조건에 관한 정보는 정성적인 것에 기인하고 있다.

o 토양정책을 집행하고 있는 ‘주택, 지역계획 및 환경부 (VROM)’ 가 1990년 의회에 제출한 예비보고서에 의하면 네덜란드에서는 대략 110,000개소의 부지가 잠재적으로 오염되었고, VROM에서 추정하는 의심되는 오염부지는 2002년 현재 200,000개소 이상이다.

- Soczo 등 (1992)과 Business Round Table(1993)에서 논의된 바에 의하면, 네덜란드에서 의심

되는 오염부지는 200,000-600,000개소 정도일 것으로 추정하고 있다.

○ 토양보호 정책의 특징은 2가지이다.

- 첫째, 높은 인구밀도, 낮은 지하수위, 높은 지하수 이용율로 인해 토양의 다기능성(Multifunctionality)의 유지·복원을 목표로 하고 있다. 기본적으로 일률적인 토양오염 정화기준을 사용하고 있다. 토양의 모든 기능을 보전하여야 하며, 토양보호의 목적은 토양을 미래의 중요하고 가치 있는 자원으로 보전·보호하려는 것이다.
- 둘째, 전반적 환경정책과 같이 토양오염지역의 정화는 정부와 산업계의 협정·협력을 중요한 기반으로 하고 있다.
  - 토양정화와 관련된 자발적 협약은 ‘산업부지정화협약(BSB, Bodemsanering van in gebruik zijnde bedrijfsterreinen)’, ‘주유소정화를 위한 석유업계의 자발적협약(SUBAT, Stichting Uitvoering Bofemsanering Amovering Tankstations)’ 등이 있다.
  - 산업부지정화협약(BSB)은 정부와 산업체가 1991년 체결한 협약으로 산업계가 그들의 오염된 부지를 향후 25년내에 자발적으로 정화하고, 정부는 이 기간 동안 이들의 오염부지정화에 개입하지 않기로 한 것이다. 이 협약의 대상에는 부지조사와 정화가 필요한 경우 우선순위 목록에 포함되어야 할 120,000개소의 산업부지가 포함된다. 이 협약에 서명하지 않은 회사는 지방정부에 보고되며, 불시에 부지조사를 실시할 의무를 부담하게 된다. 그리고 토양오염처리에 대한 주도권을 상실하게 되었다.
  - 주유소정화를 위한 석유업계의 자발적협약(SUBAT)은 석유업계의 자발적 협약으로, 이 협약의 주된 목적은 폐기된 주유소의 복원기금을 조성하는 것임. 복원비용은 유류 가격에 포함된 비용에서 각출되는 기금에서 충당하게 되는데, 그 비용은 1995년 기준 유류 1리터당 0.005Euro이다.

○ 네덜란드의 토양보호정책을 수행하는 주요 고려요소는 사전고려(Precaution)-예방(Prevention)-복원(Restoration)-토양관리이다. 토양오염의 경계 및 예방 위한 수단으로는 i) 오염물질의 누출의 저감을 위한 오염원 관리의 원칙(Source-Orientated Policy), ii) ALARA(As Low as Reasonably Achievable) 원칙, iii) 토양오염에 대한 경계 의무 등을 적용하는 것이다.

○ 토양보호에 관련된 주요법은 1994년 마련된 토양보호법(1994 Amended Soil Protection Act)으로 토양오염발생의 사전방지 및 향후에 발생하는 토양오염에 대한 책임 내용을 규정하고 있다.

- 토양보호법은 1986년에 제정된 토양보호법에 ‘잠정적 토양정화법(Interim Wet Bodemsanering: Soil Clean-up Interim Act)’을 흡수·통합하여 개정된 법이다.

- 잠정적 토양정화법은 1970년대 발생한 Lekkerkerk 사건을 계기로 1981년 5년간 한시적 조건으로 발효된 것이다.
  - 이러한 '비상단계의 법(emergency law)'을 채택한 정부의 의도는 심하게 오염된 부지를 이후 10년동안 복원하기 위한 기금을 마련하기 위한 것이었다.
  - 당시 Lekkerkerk 시의 오염이 사회에 많은 영향을 미쳤으며, 이 법의 채택은 350개소의 오염된 지역을 복원할 수 있는 10억길더(NLG, 약 US 5억7천8백만불에 해당)를 마련할 수 있을 것으로 예상되었다.
- 토양보호법의 적용 대상은 육지의 토양뿐만 아니라 수역(水域)의 토양도 포함하고 있으며, 동 법 제1조에서 '오염부지'를 "영토와 관련하여 오염되었거나 오염의 우려가 있어서, 그 오염으로 인해 오염의 원인 및 결과가 기술적, 구조적 또는 계획상의 의미와 서로 연관되어 있는 곳"으로 정의된다.
    - '심각하게 오염된 부지'란 "토양이 오염되었거나 오염의 우려가 있어서 토양중 인간과 동·식물에 도움이 되는 기능상 특질이 위기에 처하거나 심각하게 감소된 현장"이라고 정의하고 있다.
  - 토양보호법은 비료(축산분뇨, 유기비료 포함)의 사용, 고형 및 액상 폐기물의 처분, 지하저장탱크의 유류화학물질 저장, 지표수의 누출, 복원된 토양을 건축자재로의 재사용, 오염부지의 토양처리 인증하는 토양정화센터(SCG, Service Centrum Groundreingung)의 역할 등에 대해서 규정하고 있다.
    - 토양정화센터(SCG)는 합리적인 비용으로 정화목표를 달성하기 위해 VROM이 설립된 기관이다. SCG는 처리된 토양 1톤당 0.23Euro의 요금과 1.8Euro의 위해성 할증금을 징수한다. 대부분의 재원을 스스로 조달하는 경제 자립기구이다.
  - 토양보호법은 예방조치와 굴착토양에 대해 명시하고 있는 일반행정명령(GAOs, General Administrative Orders)과 오염부지 처리방법을 규정하는 회람(Circular Letter)에 의해 이 행된다.
  - 토양보호에 관련된 법으로 토양보호법(Soil Protection Act), 환경관리법(Environmental Management Act), 건축법(Housing Act) 등이 있다.
    - 건축물을 사고자 하는 사람은 지역토지등록부(local archives)에 제시된 토양의 오염정도에 관한 정보를 확인해야 한다.
  - 그 외 매립지명령(Landfill Decree), 건물자재명령(BMD, Building Materials Decree), 유독물질의 처분명령(Discharge Decree), 지하저장탱크명령(1998 Storage in Underground Tanks

Decree), 산업활동법규(NRB, Netherlands Regulation Soil Protection Industrial Activities) 등이 있다.

- 건물자재명령(BMD)는 주로 표토를 포함하여 일차 및 이차 광물에 대해 규제하며, 토양의 재사용과 토양의 보호 사이의 균형을 추구하고 있다.
  - 이 법령에서는 건축자재를 두 가지로 분류하며, 표토 사용에 대한 특별한 조건과 생산품, 연구실 및 견본추출의 검증에 대해 제시되고 있다.
- 네덜란드의 토양보호를 위한 산업 활동 법규(NRB)는 1997/1998년에 공포되었으며, 토양을 위협하는 산업활동과 시설에 대한 지방정부의 허가 지침서이다.
  - NRB는 i) 산업시설에서 토양보호를 위한 국가적인 정책 규정 ii) 불침투성의 바닥재, 덮개 및 깔판, 배수 및 하수시스템, 대규모저장탱크, 토양질의 모니터링에 관한 기술 규정 iii) 토양위해성평가와 보호의 효율성에 근거한 토양보호전략의 결정지원시스템에 대해 규정하고 있으며, 이들은 ALARA원칙(합리적으로 달성할 수 있는 최소한의 누출)에 근거하고 있다.
- 1993년 발간된 “오염된 굴착토양의 관리(Managing Contaminated Excavated Soil)”의 개정본인 “오염된 굴착토양 처리에 관한 정책자료(Policy Document How to Deal with Contaminated Excavated Soil, 1999, VROM)”에서는 깨끗한 굴착 토양, 오염의 정도가 약한 토양, 심각하게 오염된 토양에 대해 관리하는 것이다 (표 3-46).

<표 3-46> 네덜란드에서 오염부지 또는 굴착 토양의 처리 규칙

토양 질	오염부지 처리	오염된 굴착 토양 처리
목표기준 이하 (비오염)	제한 없음	제한 없음
목표기준 이상 개입기준 이하 (오염)	지역당국이 토지용도의 제한을 결정할 수 있음.*	매립지 매립은 허가되지 않음. 건축자재로 이용
개입기준 이상 (심각한 오염)	정화의 긴급성 결정	정화, 매립지 매립

\* 몇 가지 토양용도의 경우, 일반적인 절차가 규정되어 있음

- 농업용도를 위한 권고기준, 오염부지에서 건축이 허가될 수 있는가를 결정하기 위한 인체 위해성평가에 기초한 절차 등 목표기준 이상 (TH)/2 이하인 경우 토지의 사용은 금지되지 않지만, 채소류를 재배하는 부지의 경우에는 일정한 제한이 있을 수 있음

자료: Ferguson & Kasamas(1999)

### ③ 지하수 현황 및 정책

#### ㉔ 지하수 환경관련 이슈 및 현황

##### ■ 대규모 홍수와 침수로 인한 지하수환경 변화 (김규범(2016)을 재구성)

- 네덜란드는 빈번한 하천 침수, 지표홍수 발생으로 인해, 홍수관리의 일환으로서 지하수 관리를 주로 수행해왔고, 지하수 개발 기술 확보 등 지하수 수요 증가에 대응한 지하수 개발이 주요 이슈이며, 상세 이슈는 다음과 같다.
  - 기후변화로 인해 상류의 눈 녹은 물 및 강우의 배출, 하천유량 증가, 하천 침수 발생
  - New Delta Program을 통해 홍수 위험 관리: 1) 해수면 상승, 2) 지반 침하, 3) 강우 패턴 변화, 4) 온도 상승
  - 지하수 개발 기술의 확보: 지하수 수요 증가에 대응하기 위한 굴착 기술 개발의 일환으로 수평 굴착 기술(HDD; Horizontal directional drilling) 개발
  - 해수침투
- 대표적인 침수 피해는 1995년 1월에 250,000명이 대피하는 상황이 도래하였는데, 상류로부터의 눈 녹은 물 및 강우의 배출이 하천 유량의 증가를 가져왔고, 이는 네덜란드의 물 정책에 변화를 초래했다.
  - 기존에 제방의 높이와 크기를 키우는 정책에서 물의 저류 능력을 확대 정책으로 변화하였다.
    - 하천 및 그 주변의 저류 공간 확보 프로그램을 통하여 총 30여 개의 장소가 선정되었으며, 2016년 목표로 건설을 추진해왔다.

##### ■ 지하수 개발 기술의 확보 (김규범(2016)을 재구성)

- 네덜란드는 일반적으로 지하수량은 풍부하지만 낮은 지하수위를 보이는 일부 야생지역도 있다.
- 네덜란드는 NWP(National Water Partnership)와 연계하여 전세계적으로 요구되는 지하수 수요 증가에 대응하기 위한 굴착 기술들이 최근의 혁신적인 기술 확보를 위해 저 비용의 굴착 기술과 의사결정에 도움이 되는 자료의 해석에 대한 다양한 기술이 개발 중이다.
- 강변여과수 개발의 굴착 기술인 수평 굴착 기술(Horizontal directional drilling) 확보를 통해 공공 취수원의 지하수원 활용을 증대시키고 안정적 용수 확보를 도모하고자 함이다.
  - 하천, 호수, 건물 등의 바닥 하부를 관통하는 기술로서, HDD의 장심도 굴착은 스크린을 길게 하여 양수량을 증대시키는 효과가 있어 얇은 층적층에서 물을 취수할 수 있는 매우 유용

한 기술에 해당한다.

- 수평정당 취수량을 증대시키고, 다수의 수직정 굴착에 의한 환경 피해를 최소화하며, 비용이 저렴하고, 얕은 대수층에서도 적용가능한 기술이라는 점에 기술적인 관심으로 대두되고 있다.

#### ■ 담수의 해수화 방지 (김규범(2016)을 재구성)

- 담수체로의 염분의 유입은 농업지역에서 용수의 부족과 함께 큰 문제를 야기시키는데 특히 델타 지역에서 문제로 인식되고 있다.
- 관련해서 토양층내에 침투에 의한 담수의 용량 증가(강우의 인공함양 등)가 염분 확산을 어떻게 차단하는지 3개 지역에서 연구를 수행한 바 있고,
- 인공함양 프로젝트를 수행한 바 있다.
- 예를 들어, 암스테르담 Dune area에서 수 km 이상 연결된 담수체의 Ditch 또는 pond를 통하여 함양을 시키고 있으며, Dune으로부터 정수된 음용수를 취수 중이다.

#### ■ IT와 접목한 지하수 모니터링, 관리 체계 구축 (김규범(2016)을 재구성)

- 최근 IT의 발달은 National Groundwater Information System의 구축 및 활용을 강화시키고 있는데, 이를 통하여 보다 과학적인 지하수관리를 도모할 수 있게 한다.
- 지하수 자원의 이해를 위하여 Visualization 기술의 확보, 의사결정 시스템 등의 구축이 추진되고 있고, 유럽의 경우 유역이 국가 간에 걸쳐 있기 때문에 이와 같은 지역에서의 지하수 대수층의 관리를 위한 정책들이 추진되고, EU 차원에서의 협력 시스템이 운영되고 있다.
- 이와 같은 공동 정책에는 지하수의 수리수문학적인 접근, 생태적인 접근, 하천수와의 관계, 경제적 영향 등을 포괄적으로 다루고 있다.

#### ■ 비 전통적인 지하수 활용 (김규범(2016)을 재구성)

- 해안유출 지하수는 비용 면에서 해수담수화보다 저렴하고 부존량도 상당히 많아 개발의 가능성이 매우 높은 자원으로서 물 부족 시대에 대비하여 해안 배출 지하수의 활용 정책이 추진되고 있다.

- 내륙의 경우에는, 심부의 염지하수를 소형 풍력으로 염처리하는 기술을 확보함으로써 지열에너지 활용 시 발생되었던 문제점을 해소하는 등 염지하수를 활용한 ATES(Aquifer Thermal Energy Storage) 시스템에 의한 건물 냉난방 시스템이 활발히 추진 중이다.
- 약 20여년간의 ATES 프로젝트를 통하여 2006년 현재 전국에 500개 정도의 대규모 ATES 시스템이 운영 중에 있으며, 최근에는 대형 건물의 냉난방 뿐 아니라 온실 등에도 확대 적용되고 있다.

### ■ 지하수 수질 관리 및 오염 복원 (김규범(2016)을 재구성)

- 1980년대 중반에 들어 네덜란드는 고투입-고산출의 집약농업이 발달하면서 환경적 문제를 야기하면서 값싼 수입 사료를 사용하는 양돈 농가가 급격히 증가하였으나 분뇨 처리 등에 대한 대책은 마련되지 않아 지하수 오염과 호수의 부영양화 등 환경문제가 대두되어 왔다.
  - 이에 정부에서는 1986년에 비료 법에 이어 가축분뇨법 등 제도 정비를 하고, 과잉 양분에 부과금을 부여하였으며 가축분뇨 처리 상태에 대한 기록을 의무화했으며, 배출 가능한 분뇨의 양을 정해주는 총량제적 개념을 도입했다.
  - 모든 농가는 무기물(양분)의 투입과 산출 내역을 정확하게 기록하여 매년 관련 기관에 보고하고 있으며,
  - 관련 기관에서는 비료회사, 퇴비운송업자 등의 기록과 비교하여 제출된 기록의 정확성을 검증하는 시스템을 갖추는 등 제도적 장치를 마련했다.
- 지난 30여년간 지하수 및 토양 오염복원에 대한 다양한 기술과 정책을 개발하여 왔으며, 최근에 환경부는 국가 복원 프로그램을 도입하여 연간 5억 Euro의 예산을 투자해왔다.
  - 60,000 site (전체 오염 부지의 약 15%에 해당)에 대한 복원 계획을 수립하였으며, 매년 약 3,500 site를 복원하는 사업을 진행했다.
  - Special Risk-Based Approach인 HIP (Holland In-situ demonstration Programme)가 시행되어 대규모 오염 site에 대한 처리, 기술개발 및 연구가 수행되었고, 토양의 오염과정, 현장 및 자연 정화처리 기술 등이 개발되었다.
    - 24개 지점에서 토지 소유주, 지역 정부, 기술자 등이 협력하여 적용 중이다.

- 소규모 지하수 시스템의 경우, 지층 내 공기를 활용한 철 및 비소의 지중 처리에 대한 기술을 개발하고 있으며, 정상적인 경우에 음용수 수질 기준 이하로 저감되고 있으며, 농촌 지역의 안정적 수원 확보를 위하여 좋은 기술로 평가되었다.

### ■ CO<sub>2</sub> 지중 저장 (김규범(2016)을 재구성)

- CO<sub>2</sub> 저장에 심부 염 대수층과 Gas field가 고려되면서, 연구기관과 민간 기업이 공동으로 CO<sub>2</sub>저장과 ECBM 기술(석탄층에 CO<sub>2</sub> 주입하여 메탄 생산)을 병행하는 기술을 개발하고 있다.
  - 심부 염 대수층은 저류 능력이 매우 크기 때문에 유력한 대안으로 고려된다.

### ㉠ 지하수환경 보전 정책 (김규범(2016)을 재구성)

- 네덜란드의 정책수립은 중앙정부기관(Government of the Netherlands)에서 여왕과 장관들로 구성되어 정책수립에 대한 의사결정 후, 환경부는 토양·지하수 관련 정책을 수립하고 실행한다.
- 주정부기관, 관할 지방정부기관(competent Authority Municipality), 지역수질위원회(District Water Boards)와 지역 특성에 정통한 지방정부기관이 서로 협력하면서 지역에 특화된 정책을 수립하고 실행한다.
- 네덜란드는 ① 잦은 홍수 문제와 ② 담수부족에 대한 지속가능한 해결책 마련이 중점 과제이며, 이 외에도 ③ “Bestuursakkoord water(수자원 문제에 대한 행정 협약)”, ④ 수질, ⑤ 식수와 바덴 해(Wadden Sea) 등이 수자원 관리의 중점 과제이다.
- 또한 네덜란드는 해역 보호뿐 아니라 물의 재이용을 위한 절수시스템 및 수자원 기술 개발에 중점을 두고 있다.

### ■ EU WFD에 근거한 지하수 수질 보호 전략

- 네덜란드의 주요 정책은 EU의 WFD(EU 회원국간의 수자원에 대한 기본 방향을 포함하고 있음)에 근거하여 추진한다.
  - 2015년까지 지표수 및 지하수의 목표 수질을 달성
    - 지하수 수질 기준은 유럽연합의 물기본지침(WFD)과 지하수지침(GWD)을 근간으로 한다

(Government of the Netherlands, 2017).

### ■ 담수의 해수화 방지를 위한 인공함양 프로젝트(MAR) 프로젝트

- 네덜란드는 인공함양의 일부인 MAR(Managed Artificial Recharge)를 1940년대부터 시작되었으며, 해수의 유입 가능성이 높은 인구밀도가 높은 북서부 지역에서 대규모의 MAR 프로젝트들이 추진해왔다.
- 최근의 MAR 관련 사항으로는 도시지역 물 공급을 위한 MAR의 확충 사업으로서, 수요의 증가 및 생활환경의 발전에 따라 더 양질의 물에 대한 욕구가 도시지역에서 발생되고 있으며, 또한, 해안에서의 해수 침투에 의하여 지하수원이 위협받고 있는 부분에 대한 방어 대책이 필요한 상황이다.
- 하천수의 모래 저장고로의 충전 및 주입정을 활용한 충전 등은 지난 50년 이상 시행되어 왔으며, 암스테르담 등 대도시 지역의 용수 확보의 중요한 방법으로 대두되고 있다.
- 또한, 농업 및 농촌지역 물 공급을 위한 MAR storage dam의 설치 운영이 저비용 측면에서 활용되고 있으며, MARS dam은 홍수시 및 강우시 넘친 물을 침투시켜 배출을 지연시키고 함양을 유도하는 것으로서 가뭄 시에도 효과적으로 대응이 가능한 기술개발에 해당한다.
- 하수처리수의 재함양에 대한 기술 개발에도 적용 중이다.

### ■ 기후변화에 대비한 New Delta Program을 통한 홍수조절 및 용수공급, 지반침하 등 종합적 관리

- 2010년에 새로운 New Delta Program을 수립하게 되었는데, 기후변화에 대비하여 다양한 관련기관들이 협업할 수 있도록 포함하였으며, 정부 조직으로서 Delta Commissioner에 의하여 추진되고 있다.
  - Delta Program은 향후 50년 동안 변화될 환경에 대비하여 해수면 상승, 지반 침하, 강우 패턴 변화, 온도 상승 등이 주 배경으로 설정되어 있으며, 이로 인한 홍수의 위험성에 대비하기 위하여 매년 Delta program을 수립하도록 한다.
  - 이를 통하여 홍수 위험 관리 및 용수공급 등에 대한 지속성과 견고성을 확보하며, 새로운 홍수 보호 기준을 수립하고, 담수의 활용성(농업용, 산업용 등)에 대한 예측력을 제고하여 사용을 담보하며, 지역별 대책이 기후변화 등에 보다 효과적으로 대처할 수 있도록 하는

것을 주요 사항으로 추진 중에 있다 (Delta Act on Flood Risk Management and the Freshwater Supply (2012년 1월 발효)에 근거).

<표 3-47> 네덜란드의 지하수환경 관련 정책 현황

Top Topic	주요 법·지침	관련 프로그램
- 지하수 이용·공급	- 지하수 법(Groundwater Act)	
- 지하수 원수 관리 - 수량, 수질 관리 - 보전구역 설정	- 수자원 법(Water Resources Management Act, 1981) - Drinking Water Act	- 델타 프로젝트(Delta Project) - 물 관리 계획 (National Water Plan, 2016-2021)
- 지하수 측정망 구축, 운영 - 지하수위·수질 측정	- Water Act(2009)	
- 지하수 수질 관리 - 수질기준 설정	- Water Act(2009) - Groundwater Directive	
- 홍수방어 및 관리	- Water Act(2009)	
- ATES사업	- Water Act - Provincial Water Plan	

자료: 김규범(2016)

<표 3-48> 네덜란드의 지하수환경 관련 주요 법.제도

주요 법.제도 및 관련프로그램	목적	주요내용
수도법 (Water Supply Act, 1957)	정부의 물 관리에 대한 역할과 기능을 정의	- 정부의 물 관리에 대한 역할과 기능을 정의 - 먹는 물에 대한 국가가 수처리 등을 통한 안정성을 확보해야하는 책임이 포함되어 있음
지하수법 (Groundwater Act, 1981)		- 지하수의 수량 관리, 개발 시설의 등록 및 인허가, 개인 및 기업의 취수행위에 대한 관리, 각 지역별 지하수 관리 계획의 수립 등 - 지하수 취수나 인공함양의 경우에는 지역 관청의 허가를 받아야 하고, 매월 지자체 보고를 통해 관리함
수자원법 (Water Resources Management Act, 1989)	국가 수자원의 지속적이고 효율적인 관리를 촉진하기 위함	- 지표수, 지하수 뿐 아니라 국가의 환경계획과 연계된 다양한 수자원 정책을 수립 및 제정 - Water Economy Working Plan에 의하여 정책의 골격을 제공하도록 하고 있음 - 정부와 지역단위의 수자원 계획 수립과 프로그램 운영: 주로 물 취수의 허가 및 취수로 인한 평가를 담당 - 비상 시에는 정부 기관에서 물의 사용권을 제한하거나 수질에 대한 관리 권한을 부여하고 있음
델타법 (Delta Act, 1995)		- 1993년과 1995년 극심한 홍수 후에 대하천에 대한 델타 계획이 수립 - 본 법을 통하여 노후화된 제방의 보강을 위하여 기존 계획의 조속 수행 및 안전성 확보를 위한 정책을 추진 - 상류로부터의 홍수를 방지하기 위한 정책을 추진하는 근거를 제공 - 1996년말 취약한 제방을 대상으로 보강이 이루어졌으며, 1995년부터 립 부르 호 피즈 등을 따라 새로운 제방 150 km를 건설하기도 함.
수 법 (Water Act, 2009)	홍수, 물 부족, 습지 등에 대한 수자원의 통합적인 보호, 관리	- 물관련 분야의 제도(수자원법, 홍수방어법, 지하수법, 지표수 오염법, 해양 오염법 등)들을 대체하면서 통합된 법으로서 제정 - 홍수, 물 부족, 습지 등에 대한 수자원의 통합적인 보호, 관리를 다루었으며, 물 순환 시스템에서의 화학적, 생물학적 상태를 자연친화적으로 개선하고 유지하기 위한 정책을 입안토록 규정 - 상수도 공급 시스템에 대해서도 종합적인 검토
환경법에 대한 일반 규정 (WABO, 2010)		- Dutch General Provisions for Environmental Las Wac(Wet algemene bepalingen en omgevingsrecht, WABO)의 규정은 각 단일 법에서 26개의 환경 관련 허가 행위가 이루어지던 것은 단일 허가 규정으로 통합 - 이 허가는 단일 기관(정부기관 또는 법정 단체)에서 담당하게 되며, 이를 통하여 허가 기간과 불필요한 허가 절차를 간소화

<표 3-49> 네덜란드의 지하수환경 관련 주요 법.제도

주요 법.제도 및 관련프로그램	목적	주요내용
델타 프로젝트 (Delta Project)	1958년~1997년에 걸쳐 이루어진 대규모 간척 프로젝트로 홍수 위험을 줄이기 위한 목적에서 만들어져 3개 큰 강의 지역을 보호하기 위함	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1953년 북해의 폭풍과 범람으로 몰아닥친 해일 때문에 남서 부해안지역 제방 대부분이 무너지는 재해를 겪어, 그 결과 1850명의 주민과 가축 20여 만 마리가 희생되고 농지 16만ha 가 유실되는 막대한 인명과 재산피해가 발생</li> <li>- 이 비극을 재현하지 않기 위해, 델타 지역의 5개 주요 섬들을 댐과 다리로 연결하고 남서쪽 강 하구에 댐과 방벽을 쌓는 등 100km에 가까운 제방을 구축(당시 6조 원 투입)</li> <li>- 그 결과, 농업용수의 질이 향상되었고 델타 지역의 물 조절이 보다 쉬워졌으며, 섬과 반도 사이에 교통로를 제공하며, 내륙 수로의 운송이 보다 원활해지는 효과를 가져옴(이상준, 2012).</li> </ul>
디지털델타 프로젝트 (Digital Delta Project)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수 십년간의 델타 프로젝트를 통하여 기초적인 홍수 및 침수 방어 전략은 수립되었으며, 최근에는 Deltares, Delft, IBM 등이 연계하여 그 간 델타지역에서 수행된 100여개의 프로젝트에서 취득된 데이터의 관리 및 분석을 위한 시스템을 개발</li> <li>- 이 프로젝트 수행을 위하여 정부, 지역 물 단체, 대학, 민간 등이 융합한 공공-민간 파트너십이 구축이 되었으며, Data에 기반한 델타 지역의 해수면 변화, 지하수 변화 등을 융합한 홍수 예측 및 평가를 가능하게 함</li> <li>- 본 프로젝트에서는, 1) 고해상도의 도시 홍수 경보 시스템을 구축 운영하며, 2) 실시간 물 공급 상태에 대한 정보 분석을 통하여 물 공급의 균형을 유지하고 염수침입을 방지하며, 3) 각종 시설(제방, 수문, 관로, 터널, 도로 등)의 문제점을 파악하고 대응할 수 있도록 하는 등 첨단 분석을 통한 사회안전망 구축이 가능하게 함</li> </ul>
지하수 관측시스템 구축		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수 관측 시스템은 EU의 WFD River Basin Management Plans(RBMPs)에 근거하여 추진되고 관리</li> <li>- 네덜란드에는 4개의 River basin district가 존재하고 있으며, 각 분지내에 지하수 관측 시스템을 설치 운영 중</li> <li>- 지하수 관측망은 약 2,200개 정도이며, 관측 지점의 선정과 수질 모니터링의 결정은 임계값(문턱값)을 기준으로 결정이 되며, 추세 분석 등을 통하여 지역별 오염 관리를 담당</li> <li>- 음용수에 대해서는 민간 기업에서 음용수 보호구역에 관측 시스템을 구축 운영하고 있으며, 약 223개 관측시스템이 운영</li> </ul>
Sand Dune을 활용한 지하수 공급 프로젝트		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 네덜란드는 용수 확보를 위하여 자연 정화 기술의 적용을 적극 활용하는데, 북서부에 위치한 Sand dune을 활용한 완속여과 개념을 적용하여 수처리에 활용</li> <li>- 네덜란드는 지하수에서 취수하는 물이 전체의 약 70%를 차지하는데, 대규모 퇴적 분지가 형성되어 있어 대용량 지하수 개발이 가능한 국가임</li> <li>- 지하수에 포함되어 있는 철과 마그네슘, 메탄이나 암모니아 등은 수질에 문제를 일으키며, 이의 정화를 위하여 중금속류의 침전 과정을 거친 이후에 Sand dune을 거쳐 정수처리가 이루어진 후 공급</li> </ul>

자료: 김규범(2016)을 재구성

## (바) 오스트리아

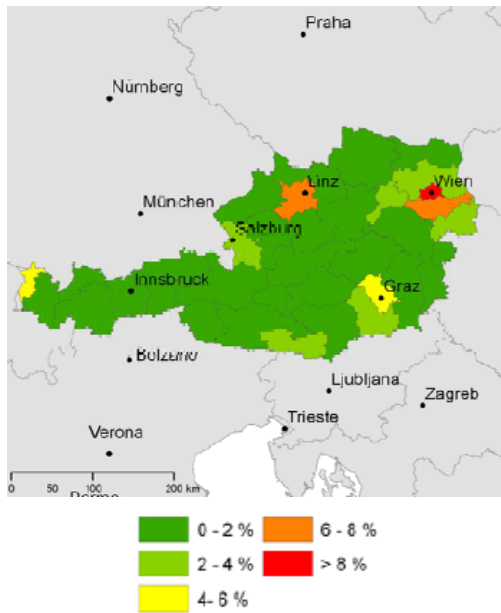
### ① 배경

- 국토 면적은 83,879 km<sup>2</sup>으로 남한의 면적보다 약간 적으며, 바다가 없는 내륙국으로 알프스 산지가 국토의 3분의 2를 차지하고 있다.
  - 국토의 32% 정도가 고도 500m 이하이며, 내륙에는 노이지들러 호(Neusiedler See), 아터 호(Attersee), 트라운 호(Traunsee), 독일, 스위스와 함께 공유하는 보덴 호(Bodensee) 등 큰 호수가 많다.
  - 농경지역이 국토의 42%, 산림지역이 국토의 39%를 차지한다.
  - 국토의 2/3 정도가 홍수, 산사태, 눈사태와 같은 자연적인 위협에 놓여 있으며, 그 외 37%의 국토는 토지이용 욕구가 높다.
- 2015년 인구는 8,579천명이며, 인구밀도는 100.3인/km<sup>2</sup> 로 1990-2006년간 인구 증가율은 4.4%로 EU 평균보다 약 2배가 높다.
- 9개의 지방자치주(Federal States)로 구성되어 있으며, 1인당 GDP가 \$51,183(2014년 기준)로 세계에서 가장 부유한 국가 중의 하나이다.

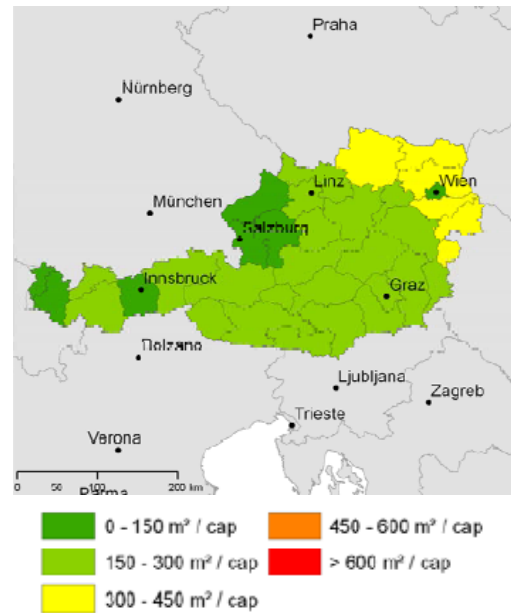
### ② 토양질 현황 및 정책

- 오스트리아 환경청 (Environment Agency)에서 잠재적인 오염부지는 9,144개소 (인구 1,000명당 1.09개소에 해당)이며, 이중에서 568개소는 오염부지(인구 1,000명당 0.68개소 해당)이다 (van Kierkerke et al., 2014).
  - 오염부지는 공공폐기물매립지 32.0%, 산업폐기물매립지 15.0%, 산업 및 공공활동에 의한 오염부지 41.0%, 저장 12.0%이다 (van Kierkerke et al., 2014).
    - Prokop et al. (2000)에 의하면 1997년 현재 오스트리아의 잠재적 오염부지는 2,545개소, 이중에서 약 135개소가 오염부지였다.
    - Prokop et al. (2000)에 의하면 1997년 현재 오스트리아의 잠재적 오염부지 현황 자료는 van Kierkerke et al. (2014)에 의해 수정되었다.
- 비엔나(Vienna), 린츠(Linz), 그라츠(Graz), 티롤(Tyrol)지역의 토양차폐율은 300m<sup>2</sup>/인 으로 다른 지역에 비해 크게 높다.

오스트리아의 차폐율 (%)



오스트리아의 1인당 차폐면적(m<sup>2</sup>)



자료: EEA(2010), EUROSTAT(2010), Prokop et al.,(2011)에서 재인용

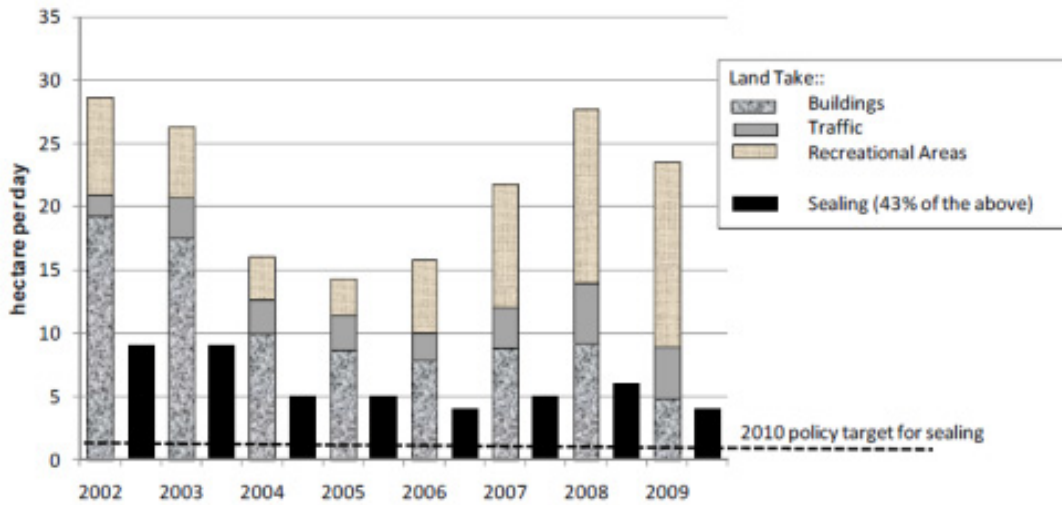
<그림 3-60> 오스트리아의 토양차폐 현황 (2006년 기준)

- 2002년 이후 토양의 차폐율은 오스트리아 환경청에서 지속적으로 모니터링하고 있으며, 토양의 차폐율을 국가지속가능성지표(national sustainability indicator)로 사용하고 있다 (BMLFUW, 2007, 2009).
- 1980년대 후반에 토양환경보전에 관련된 국가정책을 수립하기 시작했다.
  - 국가정책을 추진하게 된 사건은 생활폐기물매립지인 ‘Fischer Deponite’의 유독물질이 인근의 음용수원지로 흘러들어 500,000명이 이용하는 음용수가 위협하게 되면서이다.
- 1989년 국가정화프로그램이 도입되고 오염지역 정화에 관한 연방법 (Altlastensanierungsgesetz, ALSAG)이 제정되고, 오염지역에 대한 목록이 마련되었다.
  - 이 규정은 폐기물에 대한 과세로 오염지역의 조사 및 정화 기금을 마련하는 내용을 포함한다.
- 2025년까지 모든 잠재 오염부지를 조사 및 확인하고, 2030-2040년 기간 중에는 부지오염 으로부터 발생하는 주요문제를 관리하며, 2050년까지는 모든 오염부지를 정화하여 모든 국토가 경제적이며 자연적인 순환이 이루어질 수 있도록 하는 것이 국가의 목표이다 (van Kierkerke et al., 2014).
- 오염부지의 정화에 소요되는 비용은 공공기금이 75%, 민간이 35% 정도를 감당하고 있다

(van Kierkerke et al., 2014).

- 2011년 오염부지 정화기금은 32.6백만 유로(이는 총 GDP per capita 30,800유로, 이는 총 GDP의 0.13%에 해당)를 사용했다.
- 토양보호 전반에 관한 국가의 법은 없으나 토양오염지역정화법 (1989 Altlastensanierungs gesetz, ALSAG)이 있다.
  - ALSAG의 목적은 폐기물 처리비용으로 1989년 이전에 오염된 폐기물매립지와 산업지역의 정화기금으로 마련하는 데 있으며, 기금은 국가차원에서 설정된 우선순위에 따라 사용된다.
- 그 외 Water Act As Amended 1959, Trade Regulation As Amended 1994 등이 토양오염 문제를 다루고 있다.
  - 토양오염지역의 정화는 깨끗한 수자원 보호를 목적으로 Water Act에서 다루고 있으며, 지방정부는 이 법에 의해 업무를 확장하여 토양오염지역을 다루고 있다.
  - Trade Regulation As Amended 1994는 세탁소와 중금속 구조장 등 CHC를 다루고 있는 시설을 규제한다.
- MoEYF(Ministry of Environment, Youth and Family)는 토양오염지역의 정화에 사용하는 기금의 배분과 정화기금 마련에 책임이 있다.
  - MoEYF/UBA(The Federal Environment Agency)는 토양보호정책을 담당하는 중앙정부기관으로 오염지역을 등록, 공공기금으로 정화하게 될 우선순위를 부여하고, 부지의 조사 및 정화에 관한 적절한 기술 지침을 마련한다.
- 오스트리아 연방정부(Ministry of Environment)는 도시의 확산과 이에 따른 부지의 추가 이용, 토양의 차폐를 저감하기 위해 10개년 공간계획을 수립하고, 이를 추진 중이다.
  - 오스트리아 9개 주정부와 시정부는 연방정부의 계획을 채택하고 주 정부의 계획에 토양차폐를 저감하는 10개년 공간계획을 채택했다.
    - 연방정부의 공간계획인 ‘지속가능한 개발을 위한 오스트리아 전략(Austrian Strategy for Sustainable Development)’에는 오스트리아 토양의 차폐율을 본래의 1/10 이하로 감소시키는 것을 포함한다 (BMLFUW, 2011; Prokop et al. 2011).
  - 이를 통해, 오스트리아는 2002년 당시 토양의 연간 차폐율 9ha/일에서 최근은 5ha/일로 감소시킨 바 있으며, 궁극적으로 토양의 차폐율을 1ha/일 이하로 감소시켜 토양의 기능을 회복시키는 것으로 목표로 하고 있다.
    - 연방정부는 격년제로 토양의 차폐 정도를 모니터링 하고 있으며, 이를 보고하고 있다

(BMLFUW. 2007 & 2009).



자료: Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment & Water Management (BMLFUW, 2011; Prokop et al. 2011에서 재인용)

<그림 3-61> 오스트리아의 부지 이용 및 토양의 차폐율 (2002-2009년)

- 오스트리아 정부는 2002년 이후 다양한 수단과 방법을 통해 토양의 차폐율을 감소시키고 있다 (BMLFUW, 2002 & 2008; Prokop et al., 2011).
  - 도시의 공간계획, 부지 효과적 이용 규제 등을 통해 도시의 확장을 감소시키고 있다.
    - 2002년 이후 지속적인 토양파괴율의 감소에도 불구하고 정부의 2010년 목표인 토양의 차폐율을 본래의 1/10 이하로 감소를 달성하지 못하였으며, 이를 지속적으로 추진하기를 위해 추가적인 수단으로 새로운 공간계획 규정을 마련하고 지방의 정부에서는 다음 사항을 추가로 이를 이행하고 있다.
    - 오스트리아에서는 건축허가를 받은 부지의 약 30% 정도에서는 실제 건축 행위가 발생하고 있지 않고 있으며, 이로 인해 도시가 팽창되고 있음. 이에 따라 건축허가를 얻은 부지에서 건축허가 만료기간인 5년 이내에 건물이 지어지지 않는 경우, 건축허가를 취소하는 정책을 이행함으로써 도시 지역의 브라운필드의 재활용 또는 빈공간을 활용함으로써 도시의 팽창을 억제하고 있다.
    - 미래의 건축 및 도로 등 도시의 인프라 구조와 사용 등에 대한 공간계획과 이를 이행하기 위한 부지의 소유자와 지자체의 계약을 통해 도시 공간의 이용 효율을 높이고, 이를 통해 도시의 토양 차폐율을 감소시키고 있다.
    - 지자체의 부동산 사유지 기금 조성. 공공의 목적 또는 거주 목적, 상업목적에 의해 도심에서 부동산을 구매하려는 주민들에서 낮은 금리로 융자할 수 있는 기금을 운용하고 지

원한다.

- 도시의 브라운필드의 재이용 계획을 수립하고 이용을 제고하고 있다.
  - 오스트리아는 도시지역의 브라운필드를 이용하기 위한 특별 프로그램은 없으나 투자를 위한 지침과 민간 수단이 최근 개발되었다.
- 농지의 최적 이용 및 단편화로부터 부지 보호. 오스트리아 농경지를 보호하기 위한 연방 차원의 노력에 의해 공간계획법이 제정되었으며, 이를 통해 농촌경관과 농지로서의 기능을 보전하고 녹지의 분할을 방지하는 것이다.

### ③ 지하수 현황 및 정책

#### ㉞ 지하수환경관련 이슈 및 현황

##### ■ 지하수의 “좋은 상태” 달성을 위한 지하수 연령 연구 및 모니터링 프로그램 운영

- 오스트리아는 2010년부터 2015년까지 지하수 내 오염 물질의 유입의 확산을 감소시키기 위한 방법으로 지하수의 평균 체류 시간을 추정하는 연구를 수행해왔다 (Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017a).
- 오스트리아는 “Water quality and water protection(수질과 수질 보호)” 라는 목표 아래 다양한 모니터링 프로그램을 제공하며, 이 중 수체(water bodies)의 보호와 모니터링, 지하수 모니터링이 중점적으로 하고 있다 (Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017).

#### ㉟ 지하수환경 보전 정책

##### ■ 수자원 정책

- 오스트리아의 공공급수는 수자원관리법(Austria Water Act)에 의한다.
  - 지속가능한 물공급을 위한 지하수 이용 및 보호 정책 운영하고 있다.
- 오스트리아 수자원 정책의 주요 목표는 자원 보호, 사용 규제, 홍수 조절(Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017)이며, 각 부문별 주요 내용은 다음과 같다.
  - 수자원 및 모든 수역의 보호
    - 오스트리아의 수자원 법(수정된 Water Rights Act, 1959)에서 지표수역과 지하수 보호에 관한 명확한 목표를 설정하고 있다.

- 오스트리아 수자원 정책은 유럽연합 물기본지침(WFD)의 수자원 보호 정책 규정을 따른다.
  - 오스트리아는 2009년 물관리계획(National Water Management Plan)을 통해, 물이 “좋은 상태” 를 어떻게 달성할 것인가를 포함하고 있다.
  - 또한, 오스트리아는 사전예방적인 환경보호 및 수자원보호의 실행계획으로서 “Comprehensive monitoring programme” 을 수행한다.
  - 수자원 공급을 위한 수자원 보호는 수자원 관리의 목적이며, 지하수와 우물은 깨끗한 상태로 유지해 식수로 이용하기 위해 농경지 오염원 배출을 최소화하고 점오염원에 의한 오염을 방지하는 것을 목표로 한다.
  - 하수처리는 주요한 쟁점 중 하나인데, “사전 예방 원칙” 에 따라 최첨단 폐수 처리 의무를 부과한다.
  - 오염된 물의 연속적인 정화는 피하고, 필요에 따라 정화 성능에 대한 좀더 강화된 요구사항을 부과해야한다.
- 이용의 규제
- 물과 수역은 공공급수(식수)를 위한 양수, 관개나 동물을 위한 농업용수, 전기 생산을 위한 수력발전용, 홍수 조절, 냉각수로 이용되며, 처리 후 폐수는 수체내로 다시 유입되기도 한다.
  - 따라서 물의 지속가능한 이용과 보호를 위해 계획과 규제가 필요함을 인식하고 있다.
- 홍수 조절
- 오스트리아는 강수량이 많아 물이 풍부하지만, 빈번한 홍수를 겪었다.
  - 2009년 한 해에만 400건의 만수 및 홍수가 발생하였고, 그 피해비용은 약 2억 유로에 달한다.
  - 따라서 오스트리아의 연방정부는 1억 6천만 유로를 투자해 약 1,650개의 홍수 조절 프로젝트와 방호조치를 취하고 있다.
- 오스트리아는 영양염류(질소, 인)로 강하게 오염된 호수의 복원이 시작되면서, 수질에 대한 관심이 증가해왔다. 특정물질의 환경배출을 감소시키는 등 폐수배출법령을 통해 규제함으로써 하천의 오염 스트레스를 감소하는 정책을 수행 중이다 (Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017).
- 1991년부터 오스트리아의 지하수 및 강수, 호수의 수질은 법적으로 수립된 수자원법에서 정한 규정에 따라, 연방농림부(BMLFUW)와 9개의 지방정부가 연방환경청에서 제공하는 기술 지원을 통해 종합조사프로그램(comprehensive investigation programmes)을 수행해 오고 있다.

## ■ 지하수 모니터링 (Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017b)

- 오스트리아는 유럽연합의 물기본지침(WFD) 이행의 일환으로 연방정부의 수자원법(Water Rights Act, 1959)과 “수자원의 수질모니터링에 관한 조례”에 근거하여 3가지 유형의 관측프로그램이 각각 다른 목표에 따라 운영 중이다.
  - 감시 관측(Surveillance monitoring): 지하수 감시 관측은 모든 지하수에 대해 상태를 평가하기 위한 것으로, 적어도 6년의 관측주기를 가진다. 자연적 조건과 인간의 활동에 의한 장기적인 변화를 감시하기 위함이다.
    - 약 2,016개의 측정지점에서 pH, 용존산소, 경도, 질산염, 황산염, 비소, 납, 수은, CFC, 살충제 등을 고정적으로 적어도 3회 측정해야 한다.
    - 현재 지하수 수질 각 지하수체는 적어도 일년에 한번씩은 측정되어야 하며, 수질의 변화가 발생하지 않아야 한다.
  - 운영 관측(Operational monitoring): 좋은 상태에 도달하지 못할 위험성이 있는 지하수 수체를 대상으로 관측하는 것이다.
    - 관측항목은 오염과 관련된 성분이며,
    - 법으로 매년 최소 두 번의 측정을 하도록 규정되어 있고,
    - 오스트리아는 연 4회 검사를 실시하여 정확도에 수반되는 조치에 활용한다.
  - 조사 관측(Investigative monitoring): 경우에 따라 다르게 사용되며, 연방 주정부의 수역당국의 책임 하에 있다.

## (사) 일본

### ① 배경

- 국토의 97%를 차지하고 있는 4개의 주요 섬과 주변에 산재한 6,852개의 섬으로 이루어진 군도국가이며, 국토의 면적은 377,835km<sup>2</sup>로 한반도보다 1.7배 크며, 독일보다 약간 크다.
  - 인구는 1억2천7백만 명으로 세계에서 열 번째로 많으며, 인구밀도는 337명/km<sup>2</sup>로 비교적 높으나, 우리나라의 인구밀도인 517명/km<sup>2</sup>에 비해서는 낮다.
  - 전국을 1도(都, 도쿄 도), 1도(道, 홋카이도), 2부(府, 오사카 부와 교토 부), 43현(県)으로 구분하고 있으며, 행정상으로 별도의 정령지정도시, 중핵시, 특별구로 정해진 경우를 뺀 모든 도시는 모두 도도부현(都道府県)에 속하며 더 작은 행정 단위인 시정촌(市町村)과 도시와

시골을 몇 개씩 묶어 정리한 군으로 구성된다.

- 몇 줄기의 화산맥이 뻗어 있기 때문에 지형의 기복이 심하고, 강은 짧고 급류인 경우가 많으며 대부분의 해안선은 복잡한 리아스식 해안이다.
  - 환태평양 지진대에 위치하고 있으며 세계 화산의 10%가 일본 열도에 있다. 국토의 67%는 산지이고 대부분은 숲으로 뒤덮여 있으며 농지는 14%, 택지는 3%, 공업용지는 0.4% 정도이다.
- 제2차 세계 대전 이후, 고도의 경제 발전 과정에서 일본 정부와 산업체들은 환경 정책을 경시함으로써 1950년대부터 미나마타병, 이타이이타이병을 비롯한 환경문제가 등장하였으며, 이에 대한 강력한 사회적 비판 여론과 더불어 여러 환경법들을 제정되었으며, 1971년 환경성을 내각 행정기관에 추가하였다.
- 1990년대 이전 일본의 주요 토양에 관한 이슈는 농경지오염이었으나, 1990년대 이후 다이옥신과 산업지역 등에서의 토양오염 문제가 나타나면서, 이를 극복하기 위한 토양환경정책이 나타나기 시작했다.

## ② 토양질 현황 및 정책

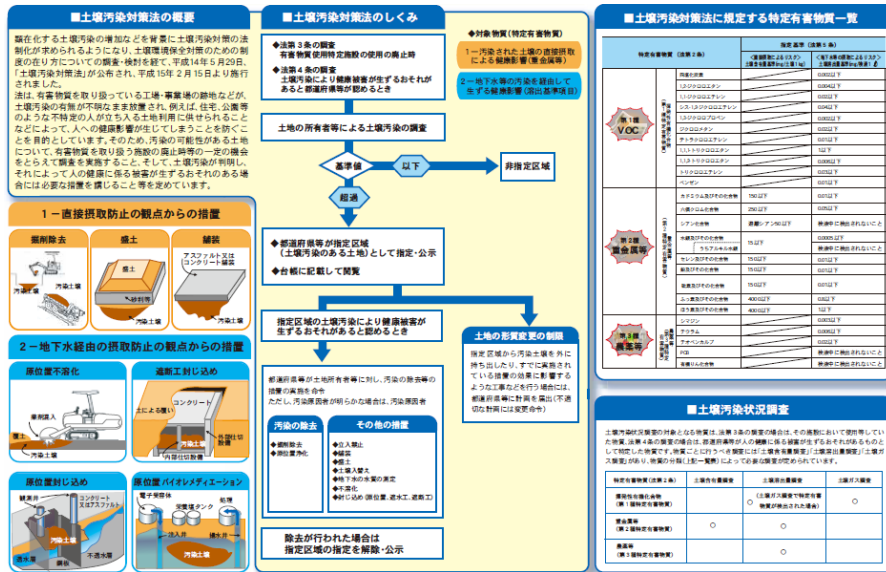
- 1990년대 이전 일본의 토양환경보전에 관한 정책은 농경지오염에 치중하였으나, 1990년대 이후 다이옥신과 산업지역 등에서의 토양오염 문제 해결을 위한 환경정책이 나타나기 시작했다.
  - 1970년 농용지토양오염방지법이 제정된 이후 1997년에는 오염된 농경지(7,140ha)의 정화 프로젝트가 76% 완료됨을 보고한바 있다 (일본 환경성, 2016).

<표 3-50> 일본 농경지 토양오염 및 정화부지 현황 (개소 및 면적(ha), 1997년 10월31일 현재)

특정유해물질	기준 초과 부지*	구분			정화 계획 부지	정화 조치 부지	정화목록 삭제부지
		정화 부지	정화완료 부지	조사정화 부지			
cadmium	92 (6,610)	57 (6,110)	34 (320)	18 (180)	57 (6,030)	57 (4,810)	41 (3,640)
copper	37 (1,430)	13 (1,250)	16 (60)	8 (120)	13 (1,250)	13 (1,200)	12 (1,140)
arsenic	14 (390)	7 (160)	2 (90)	6 (140)	7 (160)	7 (160)	5 (80)
합계	129 (7,140)	66 (6,260)	49 (460)	31 (420)	66 (6,180)	66 (4,950)	48 (3,720)

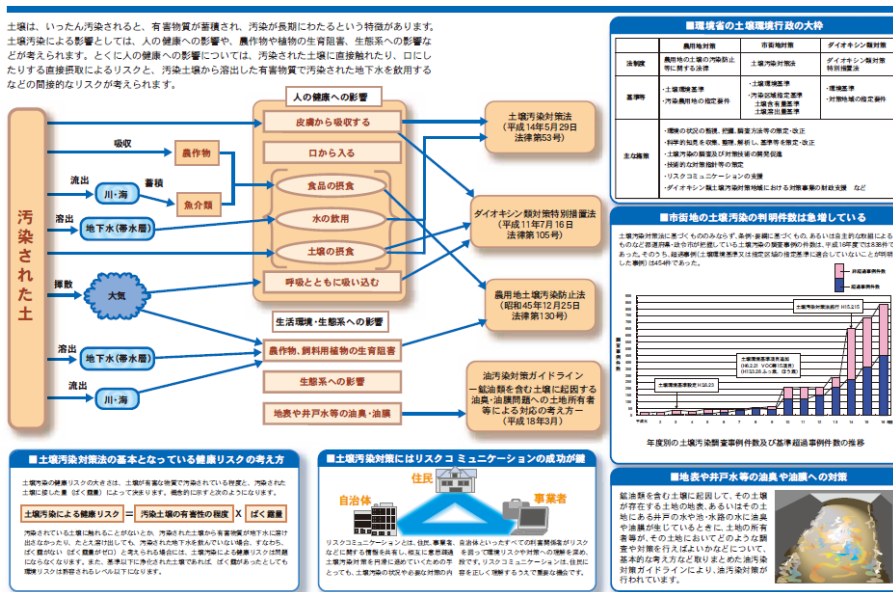
주) \*토양오염판단기준(mg/kg)은 토양오염대책법 제5조에 명시 자료) 일본 환경성(2016)

- 최근 일본 정부는 유해 물질 등에 의한 토양 및 지하수 오염이라는 부정적인 유산을 미래 세대에 남기지 않을 목적으로 농경지와 도시지역의 토양오염방지 및 농약의 안전 평가, 토양·지반 환경의 재생에 초점을 둔 정책으로 추진하고 있다.
  - 도시지역(농경지 외 지역)은 토양오염대책법(土壤汚染対策法), 농경지는 농용지토양오염방지법(農用地土壤汚染対策)에 의해 근거하여 집행한다.
  - 농약에 의한 환경오염방지는 농약단속법(農薬取締法)에 근거한 등록 보류 기준의 설정 등 농약의 위험 평가 및 관리에 관한 정책을 이행한다.
  - 토양중의 다이옥신 대책은 다른 오염물질과 구분 및 강조되어 집행한다.
- 도시지역 (농경지 외 지역)은 토양오염대책법에 근거한 유해물질 사용시설의 관리, 토양중의 유해물질 조사 및 오염부지의 지정 및 관리를 통해 토양오염을 관리한다.
  - 토양오염환경기준의 지정, 도시지역의 토양오염조사, 오염부지의 지정 및 목록화, 토양오염에 의한 건강피해의 방지, 토양오염 지정조사기관의 지정 및 토양오염조사, 토양오염대책기금의 마련 등을 이행한다.
  - 토양오염대책기금이란 법 제7조제1항의 규정에 의해 토양오염 제거 등의 조치를 지시한 자 (당해 오염을 야기 행위를 한자)를 제외한 이해당사자들의 부담 능력이 낮은 경우 국가와 지자체가 지원하는 오염부지의 정화 보조기금이다.



자료: 일본 환경 (2016) <http://www.env.go.jp/water/>

<그림 3-62> 일본의 토양환경보전 정책의 흐름



자료: 일본 환경성 (2016) <http://www.env.go.jp/water/>

<그림 3-63> 일본 토양오염대책법의 체계

- 토양오염대책법에 근거한 유해물질의 토양오염환경기준은 1986년 시가지 토양오염을 검토하는 과정에서 수질환경기준의 중금속과 유해화학물질에 대해 기준을 설정했다.
- 토양오염실태와 위해성, 토양의 다기능성에 미치는 영향(예, 식품 및 목재 등의 생산기능, 수질정화, 지하수 보존, 토양미생물배양, 자연생태계 보전, 자연경관유지, 대기정화, 온도조

절, 소음 및 진동완화 등)을 고려하여 토양에 유해한 오염물질을 설정하고 각각의 물질에 기준을 부여한 것이다.

- 산림과 토양 경사도가 높고, 집중강우로 토양침식이나 양분 용탈이 용이한 환경을 고려하여, 토양 10배 용량의 물에 이 항목에 관련된 물질을 용출시켜 용출되는 농도가 수질환경기준치 이하가 되는 것을 조건으로 토양중의 오염물질 농도기준을 설정했다.
- 또한 식품을 생산하는 토양의 기능을 보전하는 관점에서 농용지토양오염방지법 등에 관한 법률상의 특정유해물질을 정하고, 이들에 대하여 농경지토양오염대책지역의 지정요건에 준하여 기준을 설정했다.

<표 3-51> 토양오염대책법의 토양오염에 관한 환경 기준(mg/kg)

물질	Target level of soil quality (leaching and content tests)
cadmium	0.01 mg/l in sample solution and less than 0.4mg/kg in rice for agricultural land
total cyanide	not detectable in sample solution
organic phosphorus	not detectable in sample solution
lead	0.01 mg/l or less in sample solution
chromium (VI)	0.05 mg/l or less in sample solution
arsenic	0.01 mg/l or less in sample solution, and less than 15 mg/kg in soil for agricultural land (paddy fields only)
total mercury	0.0005 mg/l or less in sample solution
alkyl mercury	not detectable in sample solution
PCBs	not detectable in sample solution
copper	less than 125 mg/kg in soil for agricultural land (paddy fields only)
dichloromethane	0.02 mg/l or less in sample solution
carbon tetrachloride	0.002 mg/l or less in sample solution
1,2dichloroethane	0.004 mg/l or less in sample solution
1,1dichloroethylene	0.02 mg/l or less in sample solution
cis1,2dichloroethylene	0.04 mg/l or less in sample solution
1,1,1trichloroethane	1 mg/l or less in sample solution
1,1,2trichloroethane	0.006 mg/l or less in sample solution
trichloroethylene	0.03 mg/l or less in sample solution
tetrachloroethylene	0.01 mg/l or less in sample solution
1,3dichloropropene	0.002 mg/l or less in sample solution
thiuram	0.006 mg/l or less in sample solution
simazine	0.003 mg/l or less in sample solution
thiobencarb	0.02 mg/l or less in sample solution
benzene	0.01 mg/l or less in sample solution
selenium	0.01 mg/l or less in sample solution

주) \* 상기 기준은 자연적인 원인에 의하여 오염물질이 축적된 토양(예, 광맥주변의 토양), 원자재의 퇴적장, 폐기물매립지와 대상오염물질의 이용 또는 처분을 목적으로 하는 집적시설에 관련한 토양에는 적용하지 않음. 특히, 광산보안법 및 동법예 근거한 금속광산 등 보안규칙, 석탄광산보안규칙에 제시한 광업폐기물의 매립장, 하상저질토의 처리 및 처분 등에 관한 잠정지침 등에 관련되어 오염물질을 집적하는 시설 및 지역에는 적용하지 않음



- 토양 중 농약에 의한 환경오염방지는 농약단속법(農薬取締法)에 근거한 등록 보류 기준의 설정 등 농약의 위험 평가 및 관리에 관한 정책을 포함한다.

**■農薬汚染の現況**  
農薬については、毒性の低い薬剤の開発が進み、毒性および残留性の高いものは使用されなくなってきたことから、農薬による環境汚染の問題は少なくなっています。しかし、本来、農薬の使用は生理活性を有する物質を環境中に放出するものであり、今後とも、人体や環境に悪影響を及ぼすことのないよう、安全性を評価し、適正に管理していく必要があります。

**■農薬登録保留基準**  
国内で販売される農薬については、その使用による人畜や環境への悪影響を未然に防止するため、農薬取締法に基づき製造、輸入から販売まで使用に至る全ての過程を厳しく規制されており、農薬の登録を保留するかどうかの基準(農薬登録保留基準)等に基づいた農林水産大臣の登録を受けなければなりません。登録に關する基準のうち農薬登録保留基準として、①水産動物への被害防止に係るもの、②水質汚濁に係るもの、③土壌残留に係るもの、及び④作物残留に係るもの基準を環境大臣が定めています。

**■水産動物への被害防止に係る基準**  
水産動物に著しい被害を生じさせないための基準です。この基準は、水産動物の代表である、魚類、甲殻類及び藻類に対する毒性を考慮し設定されています。

**■水質汚濁に係る基準**  
水質汚濁が原因となり人畜に被害を生じさせないための基準です。この基準は、農薬が、河川などの公共用水域中に流出した場合に、その水を一生涯に渡って既に毎日飲用しても健康被害のない量を基に設定されています。

**■土壌残留に係る基準**  
土壌への残留により農薬が汚染され、それが原因となって人畜に被害が生じないように定めている基準です。この基準は土壌から作物に農薬が移行する場合でも健康影響のない量となるよう設定されています。

**■作物残留に係る基準**  
農産物等への残留が原因で人畜に被害がでないよう定めている基準です。この基準は、食糧衛生に定められた残留農薬基準を超えないこととされています。

**■空中濃度評価値**  
航空防除農薬について、人の健康を保護する観点から空中濃度(空気の農薬濃度)の評価を行う際の目安となる空中濃度評価値を10農薬について定めています。

**■水質汚濁性農薬の指定**  
登録された農薬についても、相当広範な地域でまわって使用され、一定の地理的条件が揃った場合等に、農薬による水質汚濁が生じ、その利用が原因で人畜に被害が生ずるおそれのある農薬等は、政府によって水質汚濁性農薬としてその使用を制限しています。現在、登録のある農薬としては、ペンゾエピン、ロテノン、シマジンの3農薬が指定されています。

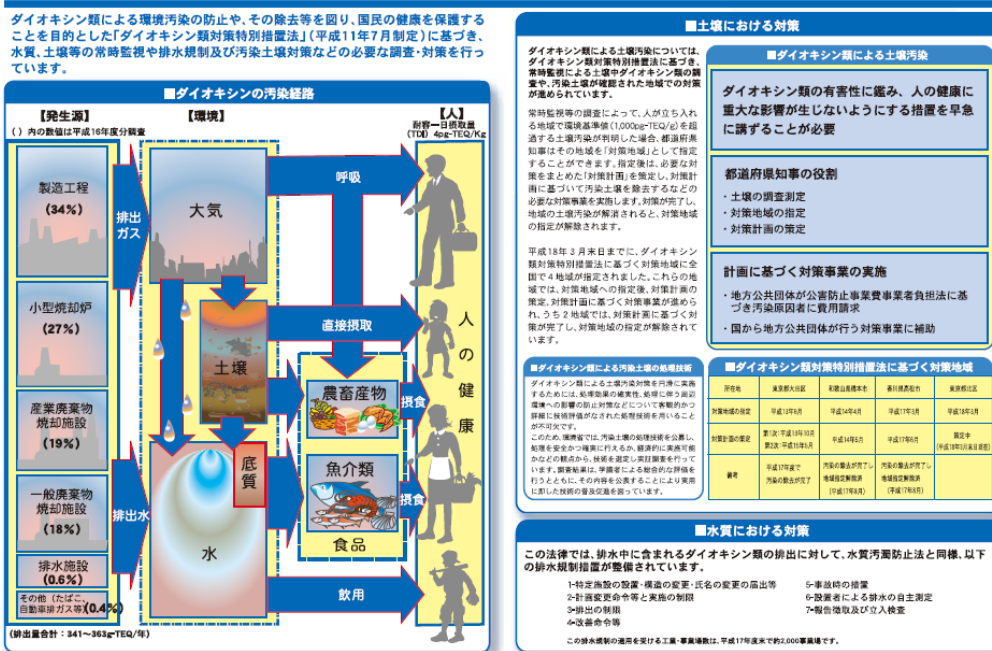
**■農薬使用基準**  
農薬の安全かつ適正な使用を確保するため、農薬使用者が守らなければならない項目を定めています。具体的には、農薬登録時に定められた、適用作物、使用時期、使用総回数等農薬容器のラベルに記載している内容について守らなければならないこと等を定めています。

**■ゴルフ場使用農薬による水質汚濁の防止対策**  
ゴルフ場で使用される農薬による水質汚濁を防止するため、「ゴルフ場で使用される農薬による水質汚濁の防止に係る暫定指針」を定め、48農薬について暫定評価値を設定しています。

자료: 일본 환경성 (2016) <http://www.env.go.jp/water/>

<그림 3-65> 일본 농약의 관리대책 체계

- 토양 중 다이옥신 부문은 다른 오염물질과 구분하여 강조하여 집행하고 있다.
- 토양 중 다이옥신 정책으로 농용지 토양 및 농작물에 따른 다이옥신 실태 조사 및 검토, 다이옥신 오염 토양 정화 기술 등 확립을 조사하고, 다이옥신류에 관한 토양 조사 측정 매뉴얼 (2009년 3월) 개정, 토양의 다이옥신 간이 측정법 매뉴얼 (2009년 3월), 토양 중 다이옥신 부적합성을 처리할 수 있는 ‘다이옥신 기준 부적합 토양 처리 지침(2011년 3월)’ 을 순차적으로 마련하였다.



자료: 일본 환경성 (2016) <http://www.env.go.jp/water/>

<그림 3-66> 일본 다이옥신류의 관리대책 체계

- 표토의 중요성을 인식하고 있으나 저렴한 경비와 공기를 앞세워 토목공사에서 이 표토를 대형 불도저 등 토공기계로 무분별하게 밀어버리거나 저층토와 뒤섞어 소실시키는 등 식생회복이 불가능할 정도로 표토를 완전히 파괴하는 식의 택지조성을 방지하기 위해 1974년에 도시계획법을 개정하였다.
  - 일정 규모 이상의 개발 행위의 개발 허가기준으로 표토의 보전과 함께 수목의 보전까지 의무화하는 규정을 두고 있다.
    - 독일의 규정과는 약간 다르나 같은 취지의 표토보전을 1975년부터 시행했다.
  - 사업승인신청구비서류를 표토보전계획에 첨부하는 것을 의무화하였다.
- 토양침식이나 홍수 방지, 수질정화 등 환경에 대한 플러스 기능을 가진 생태학적, 환경적 평가가 이루어지고 있다 (일본 농업종합연구소).
  - 홍수방지기능, 수자원함양기능, 토양침식방지기능, 토사붕괴방지기능, 유기성폐기물처리기능, 대기정화기능, 기후완화효과, 보전휴양기능 등 문화적기능을 포함한다.
  - 지반침하 방지를 목적으로 지하수 채취를 규제하는 법률로 공업용수법(1956년)과 건축물용 지하수 채수규칙(1962년)을 제정하여 일정한 지역을 지정하고 그 지역 내에서 각 용도의 일정 규모 이상의 지하수 양수시설을 허가제로 지정하였다.

- NISTEP(2010)에 의하면 ‘오염물질 이동 예측 기술’을 토양·지하수 오염문제를 해결하기 위한 신기술로 정의하고 있다.
  - 오염물질의 영향과 상태를 알기 위한 주요 분석대상은 ‘오염물질 전파의 가능성, 확산 속도, 확산이 가능한 방향 및 가능 지역, 보호가 반드시 필요한 지역에서의 오염물질의 영향 정도’에 대한 것이다.
  - 일본은 상용화 촉진을 위해 저비용 저부하형 오염처리기술을 개발하여 기술보급 중이다.
- ‘이용목적 부합원칙’과 경제적 정화방법, 친환경적 정화방법 적용을 제도화 하고 있다.
  - 2002년 이후 매년 ‘저비용·저부하형 토양오염조사대책기술 검토 조사’를 실시하여 공표하고 있다 (환경부, 2001).

### ③ 지하수 현황 및 정책

#### ㉞ 지하수환경관련 이슈 및 현황

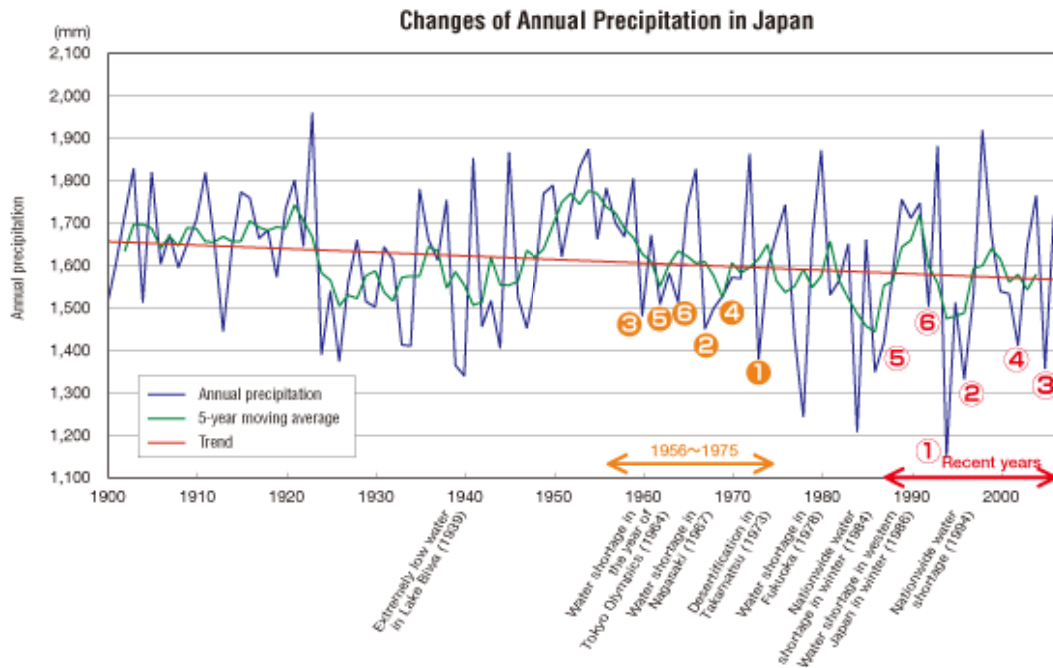
- 일본의 총 수자원량은 연간 평균 6,400억 톤으로, 이중 연간 평균 이용량은 809억 톤이다. 이 중 지표수(하천수) 이용량은 717억 톤이고 지하수 이용량은 92억 톤으로 지하수 이용률이 약 11.4%이다 (일본 국토교통성, 2017).<sup>7)</sup>

#### ■ 기후변화로 인한 물 부족의 심화 및 물공급 안정성 감소

- 일본은 과거부터 심각한 물 부족을 겪어왔다.
  - 비 와코 호수에서 1939년, 도쿄 올림픽에서 1964년, 나가사키에서 1967년, 다카마쓰에서 1973년, 후쿠오카에서 1978년에 물 부족을 겪었다.
  - 최근 몇 년 동안 물 부족 현상이 거의 발생하지 않았지만 1994년의 공급 부족은 물 공급이 중단되거나 줄어들어 약 1,600만 명이 적어도 한 번 이상 피해를 입었고 농업이 1400억 엔의 경제적 피해를 입은바 있다.
- 기후변화로 지난 100년 동안 연평균 지표 기온이 약 1℃ 상승했고, 물 부족으로 인한 피해가 발생했을 때, 그 원인이 평균에 훨씬 못 미치는 강수량 때문으로 보고된다.
  - 최근에는 최저 강우량과 최고 강우량 사이의 변동 경향이 증가하였다 (그림 3-67 참조).

7) 주: 1981년에서 2010년 간 30년 평균치임

- 지역별(14개 지역) 연간 강수량 변화를 보면, 거의 모든 지역에서 감소 추세를 보였고, 봄과 여름에 강수량이 증가하나, 겨울에는 급격히 감소하는 등 계절별 변화가 크게 나타나는 것이 특징이다.

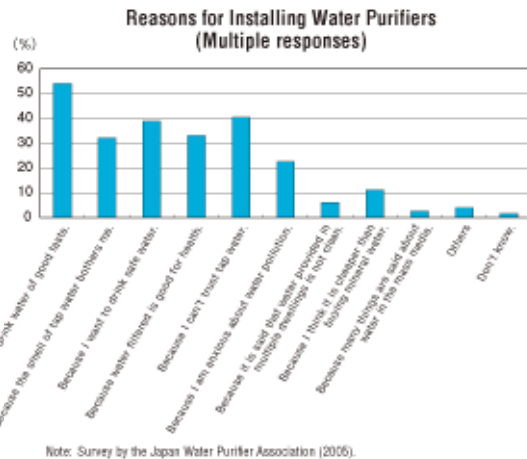
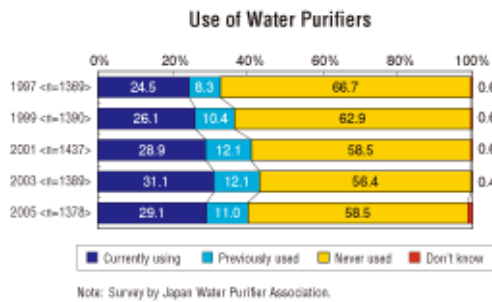
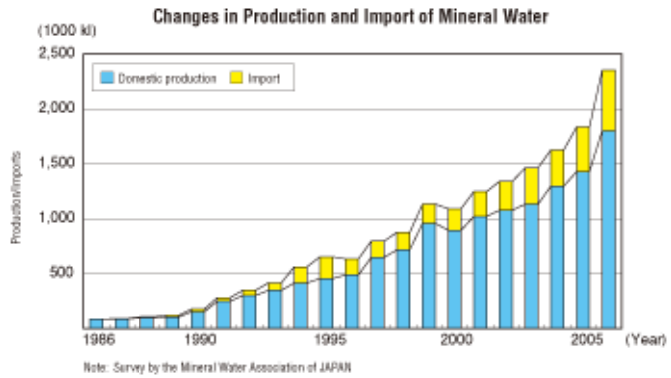
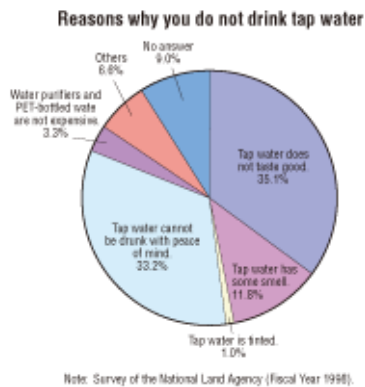


자료: 일본 국토교통성 (2017) <http://www.mlit.go.jp>

<그림 3-67> 일본의 기후변화로 인한 강수 변동 추이

### ■ 안전하고 맛있는 물에 대한 관심 증가로 병물의 소비 증가

- 일본은 과거부터 미나마타병 등 수질오염에 의한 건강상의 피해가 다수 발생해왔고, 상수도 보급률이 약 97%로 안전하고 안정적으로 물을 공급해왔으나, 최근 몇 년 동안 미네랄 워터(병물)의 소비 증가와 가정용 정수기 보급 등 “안전하고 맛있는 물”에 대한 요구가 증가하였다.



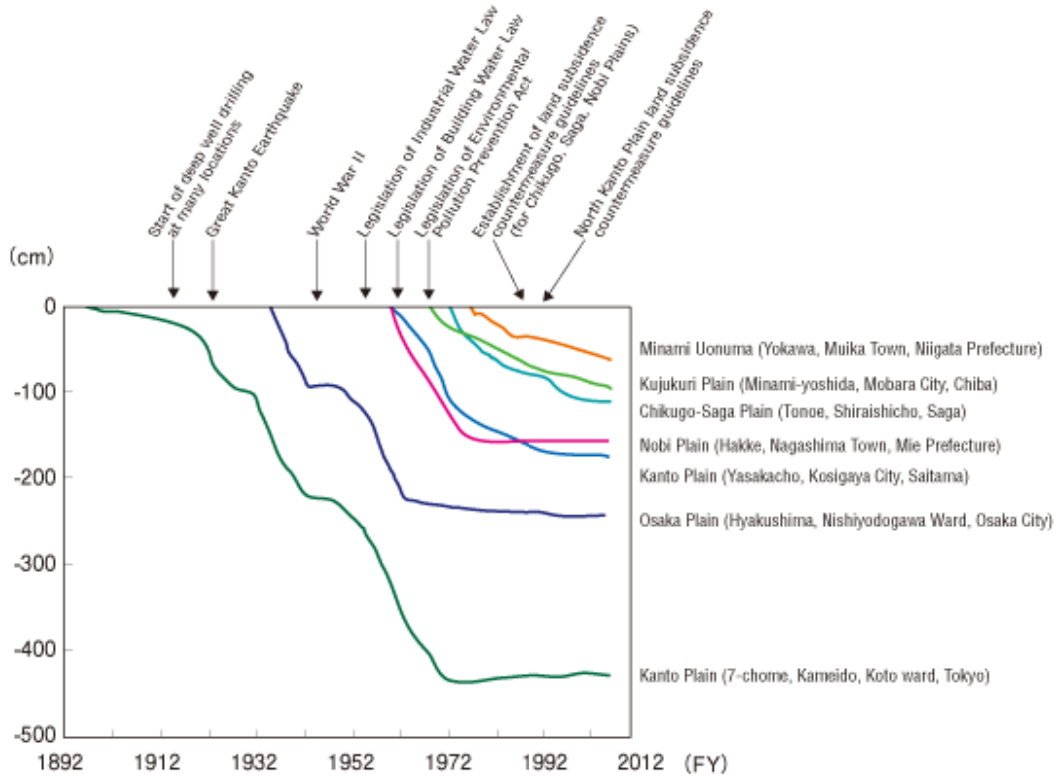
자료: 일본 국토교통성 (2017) <http://www.mlit.go.jp>

<그림 3-68> 일본의 기후변화로 인한 강수 변동 추이

### ■ 지하수 과잉 양수로 인한 지반침하, 해수침투 문제 대두 (일본 국토교통성, 2017)

- 일본 지하수환경의 주요 이슈는 지반침하, 지하수 내 염분농도 증가이다.
  - 일본의 특정 지점에서 연도별 지반침하 추이를 보면, 과거에 지속적이던 지반침하가 최근 (2012년)에 와서는 그 폭이 줄어들음을 알 수 있다 (그림 3-69 참조).
  - 그러나 지하수의 지속적인 이용으로 지반침하의 재발생의 가능성이 있기 때문에, 법률에 의거하여 섭취 제한 및 하천 유로의 전환과 같은 지하수 보전을 위한 조치를 도입하고 있다.

Transition of land subsidence over years in major observation points



Note: 1. Data from the "National Overview of Land Subsidence Areas in 2005" by the Ministry of Environment.  
2. This graph shows accumulated land subsidence in areas where land subsidence is conspicuous.

자료: 일본 국토교통성 (2017) <http://www.mlit.go.jp>

<그림 3-69> 일본 지반침하 추세

㉔ 지하수환경 보전 정책 (일본 국토교통성, 2017)

- 일본의 물과 토양에 대한 보전은 유역 전체를 고려한 종합적인 시각에서 접근하므로 모든 매체를 동시에 고려하는 것이 특징이고, 또 오염물질을 미래세대에 넘겨주지 않기 위하여 토양오염방지와 농업 안전성 평가, 지반환경의 보전을 도모하는 것이 환경보전 시책의 기본 방향이다.
- 일본은 물과 토양 환경에 대하여 공통 대책을 수립하여 시행 중이며, 이는 환경정책기본법, 환경기본계획 및 수질오염방지법에 의거한다.
- 특히 일본의 환경성은 지하수와 지반침하를 함께 다루는데, 지하수 환경 기준과 모니터링, 지하수 보전 대책, 지반대책에 대한 정책 추진 중이다.

## ■ 지하수 수질 보전 (일본 국토교통성, 2017)

- 일본에서는 지하수 수질 보전이 상수원수 등 지표수 보전 대책 보다 먼저 시행되었으며, 특히 지반침하 방지를 위해 지하수 채취에 관한 규제가 가장 먼저 시행되었다.
- 지하수의 수질 보전을 위하여 수질오탁방지법상에서 다음과 같은 것을 중점적으로 시행하고 있다.
  - 공장 및 사업장에서 유해물질의 지하 침투 규제
  - 오염된 지하수 정화 조치
  - 상시감시 등

<표 3-52> 일본의 지하수 수질 보전에 관한 법제

법명	제정년도	지하수 수질에 관한 주요 내용
공해대책기본법 (公害対策基本法)	1967년	대기 오염, 수질 오염, 토양 오염, 소음, 진동, 지반 침하, 악취에 의한 인간의 건강과 생활환경의 피해를 「공해」 라고 규정
(수질오탁방지법) 水質汚濁防止法	1970년	다수의 지하수 오염이 나타남에 따라, 유해 물질을 포함한 물의 지하 침투 금지 및 지하수의 수질 감시 체제의 도입에 의한 지하수 오염의 미연 방지, 지하수의 수질 정화에 관한 조치 명령 등에 관한 제도적 틀 마련
(환경기본법) 環境基本法	1993년	정부는 대기 오염, 수질 오염, 토양 오염 및 소음에 관한 환경 적 조건에 대한 각 사람의 건강을 보호 및 생활환경을 보전하는데 있어서 유지되는 것이 바람직한 기준」을 정함

자료: 일본 국토교통성(2017); 이수재(2015)에서 재인용

## ■ 지반침하 대책 (일본 국토교통성, 2017)

- 환경성은 매년 각 도도부 현 및 점령 지정 도시에서 제보를 받고, 지반침하의 상황이나 지하수의 이용현황 등을 정리하여, 「전국 지반환경 정보」를 환경부 홈페이지에 제공하고 있다.
- 환경성은 2014년 7월에 시행된 「물순환기본법」 제3조의 기본 이념을 바탕으로, 물순환 시스템 중 일부인 지하수 이용환경에 대한 보전 관리가 요구되면서, “지하수 보전과 지속가능한 지하수 이용을 위해~” 지침을 제정하여 지방공공단체 등에 제공하고 있다.
- 상기 지침에는 지하수 보전을 위한 기술적, 법·제도적 과제를 정리하고, 지하수의 적절한 보전 관리를 위한 방안을 제시하고 있다.

## (아) 중국

### ① 배경

- 국토면적은 9,596,961 km<sup>2</sup>으로 남한의 약 100배 정도이다.
  - 세계에서 3 또는 4위로 넓은 면적의 국가에 해당한다.
  - 지형은 동부에서 서부에 걸쳐 다양한 형태로 나타나고 있다.
    - 산악지역과 평야지대, 해안과 사막지역 등이 존재하며, 국토는 열대에서 한대 지역에 걸쳐 있다.
    - 남부지역은 언덕과 고령의 낮은 산과 들이 위치하고 있으며, 중부와 동부지역은 중국의 주요 강인 양쯔강과 황하의 델타가 발달되어 있다.
    - 서부지역에는 히말라야 등 높은 산들이 위치한다.
    - 북부지역은 고원 및 건조한 지대로 이어져 있으며 타클라마칸과 고비사막이 위치하며, 에베레스트산(8,848m)은 네팔과 중국의 경계선에 위치한다.
- 인구는 1,339,724,852인이며(2013년 기준), 주로 동남부 해안 지역에 인구 밀도가 가장 높고, 북부와 내몽골지역의 평원지대에는 인구밀도가 낮으며 인구밀도는 145인/km<sup>2</sup>이다.
- 기후는 지형학적 특성과 지역에 따라 달리 나타나며, 건기와 우기로 구분되며 여름과 겨울의 온도차가 크고 중국의 가장 큰 환경문제는 사막화이다.
  - 매년 4,000km<sup>2</sup>의 면적이 사막화되고 있으며 (Coonan, 2007), 특히 고비사막이 매년 확대되고 있는 것으로 보고된다 (Waghorn, 2011).
    - 매년 봄에 북서부지역의 사막화에 따른 강한 모래바람은 한국과 일본을 포함한 동아시아 국가들에게 직접적인 영향을 미치고 있다.
  - 수질, 침식, 오염방지 등이 사회의 중요한 이슈로 등장하고 있다.
    - 히말라야의 빙하의 녹는 양이 증가되고 있으며, 이는 잠재적으로 수억 명이 물 부족으로 고통 받게 될 것으로 예측하고 있다 (MSNBC, 2008).

## ② 토양질 현황 및 정책

### ■ 토양오염 문제의 대두

- 1980년대 급격한 경제 및 사회개발에 따른 토양오염이 사회적 문제로 나타나기 시작하였으며 1980년 말에는 토양오염이 주요한 환경 이슈로 등장했다.
  - 1979년 환경보호법(Environmental Protection Law)에 토양오염방지 내용을 포함했다.
  - 1989년 환경보호법(Environmental Protection Law)에 토양오염방지 및 관리 내용이 포함된 이후에는 토양오염이 주요 환경 이슈로 등장했다.
- 2000년 이후 국제환경 흐름에 편승하여 중국의 정부위원회(PCR' s State Council)는 농촌 지역의 토양오염방지와 관리 정책을 제고하고자 하였다.
  - 2006년 환경보호부(Ministry of Environmental Protection)는 토지자원부(Ministry of Land and Resources)와 공동으로 중국 전역에 걸친 토양오염조사 시행하였으며, 환경보호부는 토양오염을 방지하기 위한 이슈를 제기하였다.
    - 토양오염조사는 자연배경농도, 농경지의 토양질 평가, 폐기물매립지를 포함한 토양오염(예상)지역 인근 토양질 평가 등을 포함한다.
    - 토양오염조사하기 위한 토양질 기준, 토양환경조사 모니터링 기술지침 등이 마련되었다.
- 최근 2016년 3월 3일 중국 국무원이 마련한 100대 조치와 35개 조목을 포함하는 「토양오염방지행동계획」이 마련되기 이전까지 중국에서 논의되고 있는 주요한 토양 문제는 토양침식과 토양의 오남용 및 부적절한 개발로 인한 부지의 생산성 하락이었다.
  - 토양질 훼손요인으로는 토양침식, 사막화, 염화, 황무지화(sterility), 토양오염을 들 수 있다.
    - 중국 양쯔강 상·중류의 고원지대, 북부 지역(타이항산 지역), 북서부 흑색토 지역, 남부의 붉은흙 지역, 서천 지역, 운남 지역, 티벳 지역의 토양 침식이 심각하며,
    - 토양 침식 심각한 지역의 면적은 3,569,200km<sup>2</sup> (전체 지역의 37.2% 해당)로 보고된다 (중국 환경보호부, 2009).

### ■ 중국 제12차 5개년 계획(2011년-2015년)에 나타나고 있는 토양관리 정책

- 1970년 말 이후 급격한 경제 및 사회활동이 발생하면서 토양오염문제에 대한 나타나기 시작하였으며, 1989년 환경보호법(Law on Environmental Protection of the People's Republic of China)에 토양오염방지 및 조절에 관련된 내용이 포함되면서 정책이 추기되

기 시작했다.

- 2006년 중국 환경보호부는 토지자원부의 협조를 얻어 중국 전역에 대한 특별 토양오염 조사를 시행하고 중국내 토양오염에 대한 현황 및 정보를 수집하기 시작하였으며, 이후 국가의 토양질 배경 농도 및 일부 오염부지에 대한 오염원 및 오염현황 등의 조사를 수행하기 시작했다.
- CCICED (2010)에 의하면 중국의 비정상적인 개발과 이용에 의한 토양질의 훼손이 악화되고 있으며, 주요 요인은 침식, 사막화, 토양의 염화, 황무지화, 토양오염 등이다.
- 중국에서 토양침식 면적은 3,569,200km<sup>2</sup>이며, 이는 국토의 37.2%에 해당한다.
  - 이 중에서 물에 의한 토양침식은 1,612,200km<sup>2</sup> (국토의 16.8%)이며, 바람에 의한 침식은 1,957,000km<sup>2</sup> (20.4%)로 보고된다 (CCICED, 2010).
- 국토의 2,636,200km<sup>2</sup>(국토의 37.2%)에서 사막화가 발생되었다.
  - 주로 북부와 북서부 지역에서 발생하고 있으며, 주요 발생 요인은 농업부지, 방목부지, 과도한 개간 부지 조성에 의한다.
  - 최근 10년간 사막화지역에 대한 방지 정책의 실현으로 사막화 속도는 급격히 감소했고, 지난 세기의 사막화 속도는 매년 3,436km<sup>2</sup>/년에서 최근 1,283km<sup>2</sup>/년으로 감소했다
- 염화(염기가 토양에 집적)는 건조, 반건조지역, 해안 저지대의 반습윤지역에서 발생한다.
  - 염화지역은 주로 후양후하니 평원 및 북동평원의 서부지역, 황하의 헤타오 지역, 북서부 내륙지역, 동부 해안지역이며, 면적은 3.69×10<sup>7</sup>hm<sup>2</sup>인 것으로 보고된다.
  - 그 외 토양염화에 의해 영향을 받는 지역은 6.24×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>에 달한다.
- 토양의 황무지화는 토양침식 또는 훼손 등에 의해 토양의 유기질소와 탄소가 낮아지면서 토양의 생산능력이 낮아지는 현상으로 2000-2007년 기간 중에 농지의 50% 이상에서 유기질 농도가 낮음으로 인하여 생산력이 하락하였다.
  - 황무지화 되는 농지의 51%에서 인이 결핍, 60%가 칼리(potassium)가 결핍된 것으로 보고되었다.
  - 중국 농지의 평균 유기질 함량은 1.8%로 이는 유럽 유사한 목적으로 사용되고 있는 농업 토양의 50% 이하 수준이다 (<http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkqb>).
- 산업, 광산, 상업화 등에 의해 복합적이고 다양한 형태의 토양오염이 전국에 확산되어 있으나 토양오염에 대한 감시 및 관리체계는 미흡한 것으로 파악되었다.
  - 1997년 중국의 환경보고서에 의하면 국토의 약 십만km<sup>2</sup>이상이 오염된 것으로 파악되었다.
  - 2000년 중국의 환경보고서에 의하면, 환경보호부는 3천km<sup>2</sup>의 농지를 조사 및 모니터링 하

였으며, 이 중에서 12.1%인 360km<sup>2</sup> 의 농지가 중금속으로 오염된 것으로 파악하였다 (<http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>).

- 산업부지에서 토양오염은 더욱 심각하게 나타났으며, 특히 산업폐기물과 유해화학물질, 유류생산 및 판매, 제련소, 하수시설, 광산 및 농축산 폐수 등의 비점오염원 등이 효과적으로 관리되고 있지 않으며, 이로 인한 도시, 도시 인근, 사업 및 산업부지 인근의 다수 토양 및 지하수 오염이 발생하고 있는 것으로 보고되었다 (Ministry of Environmental Protection, 2008).
- 2009년 이래 중국 전역에서 30여 건의 토양 중금속 오염이 발생하면서 토양문제 해결에 대한 사회적 압력이 거세지면서, 중국 정부(국가환경보호부)는 2011년 제12차 5개년(2011년-2015년) 계획 기간 동안 중금속 오염물질 배출량 매년 15% 감소를 목표로 주요 도시 주변, 중금속 오염방지처리 중점 구역, 음용수 수원지 주변, 폐기물 적치장 등 전형적인 오염지역과 오염된 농경지를 중심으로 토양오염 처리 및 복원 시범사업을 전개하였다.
  - 5년의 계획기간 동안(2011년-2015년) 공업지역 등 중금속에 의한 토양 오염 심각, 중금속 토양오염 정화사업에 750억 위안 투자 계획 발표했다.
  - 중국의 토양재생기술은 선진국에 훨씬 못 미치는 수준이나 외국 환경보호 기업의 진출 잠재력이 크며, 실제 2008년부터 매년 30여 개의 환경보호 기업이 중국 시장에 진출한 바 있다.

<표 3-53> 중국 토양문제 정책 추진 경과

연도	항목	주요 내용
2007년	전국 토양 오염조사 시행	- 2년간 토양 환경평가 및 검측 시행 - 오염토양 시범 복원 시행
	환경보호 '11.5계획'	- 토양 복원시 필요한 명확한 항목 제시
2008년	제1차 전국 토양오염 예방 회의 시행	- 전국 토양오염 예방 작업 종료 - 계획 및 목표 수립
	토양오염예방법 기초	- 관련 정책 출범 시장진입 시스템 수립
2010년	토양오염 표준체제 제정	- 매년 3000억~4000억 위안 투입, 100여 개 프로젝트 제정
2011년	중금속오염 종합 예방 '12.5' 계획	- 중금속 등 환경오염 유발 행위 엄중 처벌 - 12.5기간 중금속 오염물질 배출량 매년 15% 감소 - 토양문제 해결에 750억 위안 투자

자료: 국가환경정보센터(中國環境市場動向, [www.konetic.or.kr](http://www.konetic.or.kr))

## ■ 「토양오염방지행동계획」 마련 및 토양오염 억제와 토질 개선

- 2016년 현재 중국 토양 환경의 총체적인 상황은 심히 우려되는 수준으로 인식하고 있으며, 일부 지역은 오염이 비교적 심각한 것으로 평가였으며, “샤오강 사회” 전면 건설에 극복해야 할 과제 중 하나로 지정하고 토양오염방지를 강화하고 철저히 이행하며, 환경의 점진적인 질적 개선을 위해 「토양오염방지행동계획」을 제정했다.
  - 「토양오염방지행동계획」(이 계획은 “토10조(土十條)”로 약칭)은 중국 국무원이 약 3년 동안 50여 차례의 초안 수정을 거쳐 발표한 것으로 토양오염 억제와 토질 개선을 목표로 하고 있다.
    - 2016년 현재 중국은 토양오염 방지만을 위한 법률 및 법규가 없었으며, 토양오염은 주로 자연자원보호, 농업 관련 법률과 법규에 의존하여 관리한다.
    - “샤오강 사회”란 덩샤오핑이 1980년대 초반에 제시했던 국가발전의 청사진으로 경제 발전만이 아니라 사회의 조화, 생활의 질, 교육수준, 환경 등이 업그레이드 된 사회(중산층화 된 사회)이다 (강택구, 함소현, 2016).
- 「토양오염방지행동계획」의 목표는 2020년까지 전국 토양오염 증가세를 기본적으로 억제하고 토질을 총체적으로 유지하며 농업 및 건축용지 기본적인 토양 환경 안전을 보장하고 토양 환경 리스크에 대한 기본적인 관리 통제를 실시하고, 2030년까지 전국 토질을 안정적으로 높여나가고 농업용지와 건축용지의 토양 환경 안전을 효과적으로 보장하며 토양 환경 리스크에 대한 전면적인 관리 통제를 실시하며, 21세기 중엽까지 토질을 전면 개선하고 생태계의 선순환을 이뤄내는 것이다.
  - 「토양오염방지행동계획」의 주요 지표는 2020년까지 오염된 경작지의 안전 이용률을 약 90%, 오염 토지의 안전 이용률을 약 90% 이상, 2030년까지 오염된 경작지의 안전 이용률을 95%, 오염 토지의 안전 이용률을 95% 이상으로 높이는 것이다 (푸처 에코, 2016).
  - 「토양오염방지행동계획」의 내용은 1) 토양오염 조사 실시, 2) 토양오염 관련 법률 제정 추진, 3) 농업용지 분류 및 관리 실시, 4) 건축용지 기준 관리 실시, 5) 미(未)오염 토양 보호 강화, 6) 오염원 관리감독 강화, 7) 오염 관리 및 복원 사업 실시, 8) 과학기술 연구 개발 확대, 9) 정부 주도 토양 관리 체계 구축, 10) 목표 심사 강화이다.
    - 「토양오염방지행동계획」의 원문은 중국 국무원 홈페이지<sup>8)</sup>, 한글번역문은 강택구, 함소현 (2016년6월30일) 참조
- 신화망(新华网), 중국환경보호신문(中国环境报), China Environment Media, REUTERS 등

8) 중국 국무원 홈페이지: [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content\\_5078377.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm)

에 의하면, 2016년 중국의 토양오염정화시장 규모를 약 1조 위안(한화 약 180조 원)으로 추정된다 (중국환경보호인터넷(中国环保在线), 2016).

- 로이터(Reuters) 통신에 따르면 중국의 모든 오염된 토지를 농작과 가축용으로 정화하는 데 약 5조 위안(한화 약 880조 원)의 비용이 소요되는 것으로 보고된다.
- 토양오염문제는 정부 예산에만 의지하여 해결하기는 어렵기 때문에 기금마련과 오염 주체 책임 강화, 정부와 민간 자본 합작 운영의 필요성이 제기되었다.
- 중국 정부는 ‘2016년 중앙재정예산’ 중 토양오염방지 특별 항목에 90억 8천 9백만 위안(한화 약1조6천억 원)의 예산을 배정하여 2014년 예산보다 145.6% 증가한 것으로 파악되었다.
- 2015년도에서 6억 위안이 이월되어 총예산은 96억8천9백만 위안(한화 약1조7천억 원)으로 약 3배정도 증가했다.

### ③ 지하수 현황 및 정책

#### ㉓ 지하수환경관련 이슈 및 현황

##### ■ 중국의 수자원 중 지하수 현황

- 최대 이용가능한 수자원 총량은 2.8조 km<sup>3</sup>/년으로 브라질, 러시아, 미국, 캐나다에 이어 세계 5위로 결코 작은 규모가 아니나, 인구가 많아 연간 1인당 수자원량은 약 2,000m<sup>3</sup>로, 세계 평균수준의 4분의 1정도이다 (물산업통계정보시스템, 2011).
  - 유엔개발계획(UNDP)이 정한 물 스트레스(water stress)상태에 다가가고 있음을 보여준다.
- 중국의 수자원 문제는 크게, ① 수자원의 지역별 분포와 계절 분포의 불균형, ② 물 이용량의 증대와 함께 주요 하천의 수질오염이 전혀 개선되지 않는 점, ③ 선진국에 비해 중국의 농업관개용수의 낮은 이용효율, ④ 농촌지역의 안전한 음용수 확보가 어려운 점이다 (물산업통계정보시스템, 2011).
  - 중국 지하수 자원(평균 8,218억m<sup>3</sup>)의 지역적 분포를 보면, 북부 지역(중국 총 면적의 64% 차지)의 지하수 자원의 양은 2,458억m<sup>3</sup>(약 30%), 남부 지역은 5,760억m<sup>3</sup>(약 70%)의 불균형을 나타내고 있다 (중국 환경보호부, 2011).
  - 또한, 하수 누출수, 비료와 농약의 침투, 도시하수, 쓰레기 및 산업폐기물의 침투 등으로 일부 지역에서는 오염 문제가 점점 대두되었다.
  - 지하수 수질의 지역적 편차는 북부보다 남부에서 좀 더 좋은 수질을 갖는데, 국가지하수

수질기준(GB/T14848-93)에 따르면, 1~3등급의 지하수는 37%, 4~5등급 지하수는 63%로 평가되었다.

- 2016년 최근에는 중국 서부의 급성장에 따른 물 공급대비 수요 증가와 개선되지 않는 주요 하천의 수질오염 문제와 최근 지하수 수질오염의 심각성이 대두되고 있다.

## ■ 지하수 수질오염 및 방지를 위한 정책적 제도 마련의 필요성 대두

- 2009년 일부 지역(베이징, 요녕, 길림, 상해, 강소, 하이난, 광둥 및 닝샤, 기타 도시)의 641개 지하수 수질 분석 결과, 1등급 지하수는 2.3%에 불과하고, 2~3등급은 23.9%, 4~5등급 지하수는 73.8%로 평가되었다 (중국 환경보호부, 2011).

- 주요 오염 지표는 질산성 질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 철, 망간 등이다.

- 《全国城市饮用水安全保障规划(2006-2020年)》에 따르면, 202개 도시 내 20%의 지하수가 식수 수질기준을 초과하는 것으로 나타났다.

- 중국 환경보호부(2011)에서 통계 분석으로 평가하는 지난 10년간 지하수의 수질 변화는 지하수 오염이 확산되고, 깊은 곳까지 오염이 침투한 것으로 해석하고 있다. 또한 남쪽보다 북부에서 지하수 수질이 더 악화되어 있고, 도시지역에서 주로 오염이 심한 것으로 보고된다.

- 지하수 오염 원인을 최근 급속한 도시화로 인해, 도시 하수 배출의 증가로 보고 있음. 또한 자금 부족으로 배수관 설치, 유지 보수 등이 원활하지 못하면서 배수관의 누출, 불안정한 하수처리, 홍수로 인한 폐수 유출, 매립지 침출수 누출, 산업 폐수 투기 등이 지하수를 오염시키는 것으로 보고 있다 (중국 환경보호부, 2011).

· (오수 처리 부족) 도시 오수 처리 투자 운영 공장은 2010년 2832곳, 처리량은 하루 1억 2500㎥로 2005년보다 배로 성장했으나 과거 5년간 전국 도시 오수 처리율은 2005년 52.4%에서 2010년 77.4%로 선진국의 90%와 비교했을 때 여전히 뒤떨어진다.

- 농촌지역 지하수환경을 위협하는 요인으로는 비료와 농약이며, 중국의 경우 세계 평균 이용량의 각각 2.8배, 3배에 해당하면서, 지하수내 암모니아성, 질산성, 아질산성 질소 등의 유기오염을 유발한 것으로 보고 있다 (중국 환경보호부, 2011).

- 2011년 이전 환경보호산업 확산으로 지표수의 수질은 눈에 띄게 개선됐으나, 지하수 수질 오염은 오히려 악화되었다 (해외시장뉴스, 2011.9.28.).

- 일부지역의 도시 오수, 생활 쓰레기, 공업 폐기물 및 화학비료, 농약 등이며, 이들의 누출이

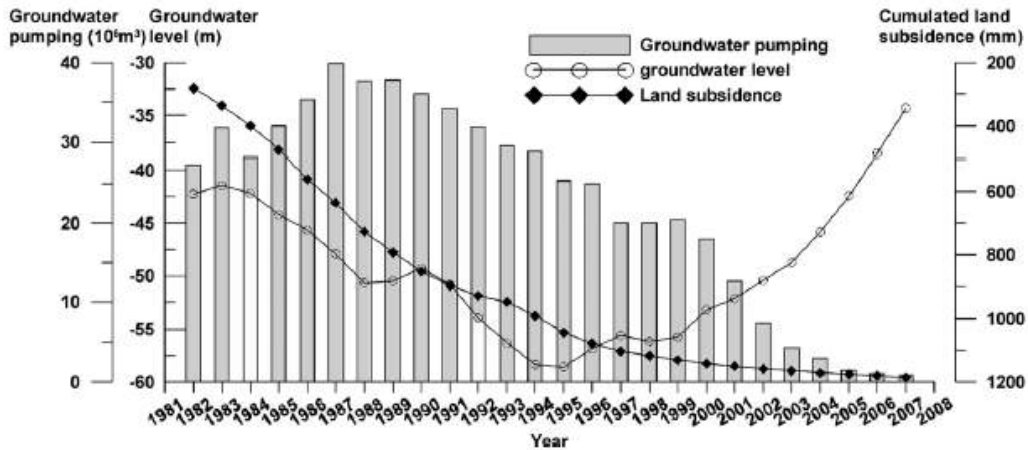
나 침투로 인한 지하수 환경의 악화를 보이고 있다.

- 중국 전체 90%의 도시 지하수가 유기·무기 유해 오염물의 오염 피해가 악화되며, 국토 자원부의 최근 조사에 따르면 40%의 도시 지하수의 수질이 끊임없이 악화되었다 (중국, 지하수 오염 방지 계획 통과, www.globalwindow.org)
- 중국 수리부(水利部)의 연례보고서에 따르면, 2014년 2071곳의 지하수 수질을 조사한 결과 약 50%가 “아주 불량(quite poor)”, 약 36%는 “극도로 불량(extremely poor)” 판정을 받은 것으로 나타났다.
- 2016년에도 여전히 중국은 농장과 공장의 오폐수, 가정의 생활하수가 정화되지 않은 채로 그대로 방류하면서 중국 전역의 하천과 인근 지하수 오염이 대두되었다 (주간무역, 2016.04.12.).
- 중국의 통신매체에 따르면, 중국 전역에서 사용되고 있는 지하수를 대상(2,103개)으로 한 조사에서 80.2% 이상이 4~5등급 수질로 음용수로서 부적합한 것으로 판정되었다.
  - 조사대상 지하수의 47.3%는 5등급 수질로 판정되고, 망간과 불소, 트리아졸 등 독성물질을 함유하고 있어 공업용수로도 사용할 수 없는 물에 해당한다.
  - 조사대상 지하수의 32.9%는 4등급 수질로 공업용수로만 사용가능하다.

## ■ 지하수 고갈, 지반침하 발생 등 지하수 사용량 규제의 필요성 대두

- 중국 환경보호부에 따르면, 1970년대 중국의 한해 지하수 사용량은 570억㎥ 정도였으나, 2009년에는 중국 총 물 사용량의 5분의 1 수준인 1,100억㎥로 늘어났다 (주간무역, 2016.04.12.).
- 중국 북부의 건조지역에서는 물 사용량의 3분의 2를 지하수로 충당한다.
- 지난 수십년간의 지하수 개발로 인해 지반침하가 발생되고 있다.
  - 양자강 하구 부근에 위치하는 Suzhou시는 1981년부터 1995년까지 지하수를 과다 양수하면서 지하수위 저하와 지반침하가 매년 발생했으나, 지방정부의 지하수 사용 저감 정책으로 1995년 이후에는 서서히 지하수위가 회복하는 추세이다 (김원영(2014)<sup>9)</sup>, 그림 3-70 참조).
  - 중국의 지하수는 도시와 농촌지역의 물 공급의 중요한 수원이지만, 최근 몇 년 동안 급속한 경제 및 사회 개발, 지하수 자원 개발, 지하수 과잉 양수로 지하수위가 지속적인 감소해온 것으로 보고 있다 (중국 환경보호부, 2011).

- 지하수 채굴량은 이미 공급량의 18%를 차지했고, 북방지역 65%의 생활용수, 50%의 공업용수와 33%의 농업관개용수를 지하수에 의존하며 전국 657개 도시 중 400여 개의 지하수를 음용수로 활용하고 있는 실정이다 (해외시장뉴스, 2011.9.28.).
- 도시화, 공업화가 점점 빨라지고, 일부 지역 지하수의 채굴이 과도하게 많아지면서 수위가 지속적으로 하강하고 있다 (해외시장뉴스, 2011.9.28.).
- 현재 북쪽으로 하얼빈, 서쪽으로 우루무치, 동쪽으로 상하이, 남쪽으로 하이커우에 이르기까지 거의 모든 중·대도시에 과도한 지하수 채굴로 인해 지하 천연 구멍이가 발생하는 사례가 발견된다 (해외시장뉴스, 2011.9.28.).



자료: 김원영 (2014)

<그림 3-70> 중국의 지하수 양수에 의한 지반침하 예: 중국 Suzhou시의 지하수 양수량 변화와 지반침하 변화율(1981-2008)

#### ㉔ 지하수환경 보전 정책

##### ■ 「국가지하수오염방지계획(全国地下水污染防治规划)」 마련

- 2011년 10월 28일 중국 환경보호부는 오는 2020년까지 지하수 오염원을 차단하는 계획인 “국가 지하수 오염 방지 계획(2011-2020)” 을 발표했다 (중국 환경보호부, 2011).
- “국가 지하수 오염 방지 계획(全国地下水污染防治规划) “은 중국의 경제 및 사회 발전의 중추적인 전략을 지지하고 전반적인 수질을 개선하기 위해, 수질 오염 조절 유형을 설립함으로써 지하수와 지표수의 시너지 조절을 위한 중국 수질 오염 조절 시스템을 소개하는 ”

계획 “ 문서로 중국 최초의 지하수 오염 예방 및 조절 프로그램 문서이다.

- 「국가지하수오염방지계획」의 기본 원리는 ① 우선적인 예방, 종합적인 예방 및 통제, ② 집중 및 홍보, ③ 책임을 할당하고 감독을 강화하는 것이다 (중국 환경보호부, 2011, p.8).
- 「국가지하수오염방지계획」의 계획목표는 “2015년까지 기본적으로 지하수 오염원과 지하수 수질 악화 추세를 막고, 총체적인 지하수 환경을 관리 및 감독하는 시스템을 구축하는 것이며, 2020년까지는 대표 지하수 오염원에 대한 전면적인 통제와 중요한 지하수 식수원의 수질 안전에 대한 기본적인 보장을 위해 중점 지역 지하수 수질을 개선하고, 지하수 환경의 관리·감독 능력을 제고시켜 지하수 오염 방지 체계를 완성하고자 하는 것”이다 (중국 환경보호부, 2011, p.9: 해외시장뉴스, 2011.9.28.에서 재인용).
- 「국가지하수오염방지계획」의 주요 업무는 8가지는 다음과 같다 (중국 환경보호부, 2011, p.10-16: 해외시장뉴스, 2011.9.28.에서 재인용).
  - 1) 지하수 오염 현황 조사 실시
    - 수문 지질구조, 취약점, 오염 현황, 잠재 수자원량 및 그 기능과 행정구역 등을 고려하여, 지하수 오염 방지 구역 시스템을 구축, 지하수 오염 방지 구역 모델링, 예방 관리 구역 및 일반 보호지역 설정
    - 2015년 말까지 지하수 오염 조사 및 상태 평가 완료, 지하수 오염 조건의 기본적인 이해, 원인과 지하수 오염 거동에 대한 심층 분석 수행
  - 2) 식수원으로서의 지하수 환경 안전 보장(엄격한 지하수 식수원 보호 및 환경법 집행)
    - 정기적으로 법에 의거해 식수원 보호구역 내의 불법적인 건설사업과 폐수 배출구를 금지시켜 기일을 정해 지하수 오염의 폐해를 정비
    - 지하수 식수원 오염방지프로그램(地下水饮用水水源污染防治方案) 개발
    - 지하수 식수 위험 방지기구(地下水饮用水水源风险防范机制) 설립
  - 3) 도시지역 지하수 오염의 엄격한 관리
    - 기존 수도관 체계를 정비해 도시 생활 오수 처리율과 재 사용률을 높이며, 쓰레기 매립장 건설과 정비를 강화하여 도시 지하수의 오염부하량 감소 도모
    - 슬러지 처리시스템 구축으로, 표준 저장 슬러지 처리 및 처분 요구사항을 엄격히 준수하고 무해한 슬러지로 처리 및 처분 강화, 도시 하수관 누출 조사 등 도시 지하수 오염 감독을 개선하고 검사, 조사, 관리, 보수하는 방법 개발
  - 4) 산업에 의한 지하수 오염 방지 강화
    - 중점 공업의 지하수 환경의 관리·감독을 강화하고, 석유 화학 공업과 지하 공정 시설,

지하 탐사 및 채광 작업으로 인한 지하수 오염을 방지해 공업 위험 폐기물의 지하수에 대한 영향을 억제

- 5) 농업지역 비점오염원에 의한 지하수오염 분류

- 화학 비료와 농약의 사용을 점차적으로 줄이고, 수자원 보호 구역 내에서 경작지의 삼림과 초원으로의 환원을 실시

- 6) 토양에 의한 지하수 오염 예방과 통제 강화

- 효과적인 조치를 통해 오염된 토양과 오수 관개가 지하수를 오염시키는 것에 대한 철저한 방지

- 7) 지하수 오염 정화 실시 계획 추진

- 지하수 오염의 회복의 계획적 추진과 지하수 오염이 심각한 지역을 회복 시범지역으로 정해 해수 침입 종합 방지 시범을 시행하며, 착정과 광정 등을 폐기 하는 오염 경로를 절단

- 8) 지하수환경 모니터링시스템 구축 및 개선

- 오염조사 및 중점 지역의 지하수 환경 모니터링 시스템과 전문적인 지하수 환경 모니터링 단체 설립

- 「국가지하수오염방지계획」의 추진 사업은 1) 지하수 오염 조사 프로젝트(地下水汚染調査項目), 2) 지하수 식수원 오염 방지 시범 사업(地下水饮用水水源污染防治示范项目), 3) 일반지역의 지하수 오염 방지 시범 사업(典型場地地下水汚染預防示范项目), 4) 농업지역 비점오염원 제어 시범 사업(農業面源污染防治示范项目), 5) 지하수 정화 시범 사업(地下水汚染修復示范项目), 6) 지하수 환경 규제 역량 강화 프로젝트(地下水環境監管能力建設項目)이다 (중국 환경보호부, 2011, p.16, 17: 표 3-54 참조).

<표 3-54> 중국 「국가지하수오염방지계획」 추진 사업 투자계획 및 주요내용

주요 사업	투자금액 (억 위안)	주요 내용
지하수 오염 조사 프로젝트 (地下水汚染調査項目)	27.0	- 지하수 오염 조사 지역 약 4,400천km <sup>2</sup> , 지하수 오염 중점 조사 지역 약 1,050 천km <sup>2</sup> 조사 예정
지하수 식수원 오염 방지 시범 사업 (地下水飲用水水源汚染防治示范項目)	43.0	- 차수벽을 통한 하수 누출 흐름 제어, 오염지하수 지역 정화 등
일반지역 지하수 오염 방지 시범 사업 (典型場地地下水汚染預防示范項目)	199.7	-
농업지역 비점오염원 제어 시범 사업 (農業面源汚染防治示范項目)	59.9	-
지하수 정화 시범 사업 (地下水汚染修復示范項目)	14.3	-
지하수 환경 규제 역량 강화 프로젝트 (地下水環境監管能力建設項目)	2.7	-
투자금 합계	346.6	-

자료: 중국 환경보호부(2011) p.25 이용하여 연구진이 재구성

- 「국가지하수오염방지계획」에 따른 지하수 보호 조치사항으로는 1) 책임을 명확히하여, 조직 및 조정을 강화, 2) 규정 및 기준을 개선하여 법 집행 및 관리를 강화, 3) 혁신적이고 경제적인 정책을 위한 자금 조달 기구의 확대, 4) 과학 연구의 중요성을 기반으로 기술지원 향상, 5) 대중의 참여를 장려하기 위한 선전 강화, 6) 감독 및 심사, 평가 기구의 설립 강화 등이다 (중국 환경보호부, 2011, p.18-22).
- 「국가지하수오염방지계획」은 공업 폐수 배출의 관리를 강화하고, 관련 법률의 강화 및 감독의 심화를 포함하고 있다.
  - 국내의 국가 정책방향 제시를 위한 “국가지하수(수질)관리계획”과 유사하나, 지하수 관리 목표가 “지하수 오염 방지”라는 것에서 차이가 있다.
  - 중국은 상기 계획을 계기로 지하수 오염 실태 파악과 기존법률의 강화, 나아가 오수처리와 관련된 구체적인 법률을 마련하고 배출 기준을 강화하는 것이다.

#### ■ 지하수 오염 방지 프로그램(中国地下水污染防治方案) 마련

- 2015년 말에 중국 화베이(華北) 평원의 지하수 수질 악화 추세를 초기에 억제하고, 오는 2020년에 지하수 식수원 수질을 뚜렷이 개선시킨다는 목표를 제시하였다.

- 먹는물의 보호와 지하수 오염 문제를 해결하기 위해, 6년간의 논의 끝에, “우선 예방을 통한 보호와 조절과 예방을 결합한 지하수 오염방지 원칙: 2015년을 작성하였다.
- 지하수 오염원의 포괄적인 모니터링을 위해 2020년 지하수 오염의 초기 제어, 지하수 수질 저하, 지하수 환경모니터링 시스템의 역제를 포함하고 있다.
- 중국의 환경오염방지 및 제어를 통해 시스템 관리의 새로운 단계에 진입했다.
- 예방 및 관리, 예방 및 치료에 대한 수동적인 대응을 능동적으로 전환하였다.

### ■ 관련 법 개정을 통한 환경보호 규제 강화

- 물 오염 방지법(水污染防治法) 중 지하수 오염 방지와 관련해서는 폐수 및 폐기물 무단 투기, 저장 등에 대한 금지사항과 오염지하수의 채굴, 지하건설 공사 시 지하수 수질 방지 조치 등을 포함하고 있다 (표 3-55 참조).
- 최근 중국 정부는 2015년 신(新)환경보호법을 개정하여 환경보호에 대한 규제를 대폭 강화했고, 대기오염방지법, 물오염방지법에 이어 최근에는 토양오염방지법 등 개별 법령을 제정하여 지하수, 토양 등 전반적인 규제를 강화하고 있다 (중국 환경보호부, 2015).

<표 3-55> 중국 「물 오염 방지법(水污染防治法)」에 의한 지하수 오염 방지 규정

「물 오염 방지법」 목적 및 주요내용	1984년에 제정되어, 1996년, 2008년 개정을 통해 수질 오염 예방의 중요한 역할을 하고 있음 “물오염방지행동계획”을 결정하기 위한 조치이행에 대한 수정안	
지하수 오염 방지 규정	본법 제5장 41조~45조	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기업이 수켓구멍, 틈, 종유동 등을 이용해 유독물질을 포함한 폐수, 병원균을 포함한 폐수 및 기타 폐기물을 버리는 것을 금지</li> <li>- 기업이 틈이 있는 좋지 않은 지층에서 누수방지 조치가 없는 하수도를 사용해 저수지수송 혹은 독성이 있거나 병원체를 포함하는 폐수를 저장하는 것을 금지</li> <li>- 이미 오염된 지하수가 다른 지하수와 함께 섞여 채굴되는 것을 금지</li> <li>- 지하 공사는 보호성 조치를 취해 지하수가 오염되는 것을 방지해야 하며, 인공 보충 지하수가 지하 수질을 악화시키는 것을 금지</li> </ul>
	실시세칙 제4장	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생활 음용수 지하수 자원 보호구역에서 오수 관개의 이용, 유독 오염 물질이 포함된 침적물로 만든 비료의 이용, 맹독성 및 고 잔류 농약의 이용, 축수층 구멍, 틈새 및 폐광에 축적된 석유, 방사능 물질, 유독 화학품, 농약 등의 이용을 금지</li> <li>- 축수층 구멍, 틈새, 및 폐광에 축적된 석유, 방사능물질, 유독 화학품, 농약 등을 이용하면 10만 위안 이하의 벌금에 처함</li> </ul>

자료: 해외시장뉴스(2011.9.28.)

### (3) 국제 동향

#### (가) UN의 지속가능한 개발 목적 (Sustainable Development Goals)

- 1972년 6월 환경보전과 경제개발 문제를 연결시키는 유엔인간환경회의(UNCHE, UN Conference on Human Environment)가 개최된 이후, 인간과 환경에 관한 국제적인 흐름을 타고 1992년 6월 브라질 리우데자네이루에서 개최된 UN Conference on Sustainable Development(UNCSD) 회의에서는 지속가능한 개발이 본격적으로 거론되었다.
  - 1992년 UNCSD는 인간을 중심으로 하는 지속가능한 개발이 진행되고 인간은 자연과 조화를 이룬 건강하고 생산적인 삶을 향유해야 한다는 것이 공론화된 시발점으로 ‘리우선언문(Rio Declaration on Environment & Development)’ 과 ‘의제21(Agenda 21)’을 채택했다.
- UNCED 회의가 20년이 지난 시점에서 지속가능개발은 Post-2015 발전목표를 이어 가는 인류의 미래를 이끌어 가는 목표로써 지속가능개발 목적(SDG, Sustainable Development Goals)이 유엔총회(UN General Assembly)에서 논의되어 2015년 제68차 유엔총회 (UN General Assembly)에서 채택했다.
  - SDG는 유엔총회에서 지정한 8차례의 공개작업반 회의 (Open Working Group, OWG)를 거쳐 채택한 것으로, Millennium Development Goals (MDGs)이 마무리되는 2015년 이후 2030년을 목표로 하는 후속 조치이자 정치적 선언(political declaration)에 해당한다.
- SDG는 2030년을 목표로 하고 있으며, 전체 17개 Goals(목적)과 169 targets(목표)로 구성되어 있으며, SDG 19개 목표에 토양이 직, 간접적으로 연계되어 있다.

<표 3-56> UN 지속가능한 개발 목적 (Sustainable Development Goals)과 주요 내용

번호	목적	내용
1	No Poverty	- End poverty in all its forms everywhere
2	Zero Hunger	- End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture
3	Good Health and Well-being	- Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages
4	Quality Education	- Ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all
5	Gender Equality	- Achieve gender equality and empower all women and girls
6	Clean Water and Sanitation	- Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all
7	Affordable and Clean Energy	- Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all
8	Decent Work and Economic Growth	- Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all
9	Industry, Innovation and Infrastructure	- Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation
10	Reduced Inequalities	- Reduce income inequality within and among countries
11	Sustainable Cities and Communities	- Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable
12	Responsible Consumption and Production	- Ensure sustainable consumption and production patterns
13	Climate Action	- Take urgent action to combat climate change and its impacts by regulating emissions and promoting developments in renewable energy
14	Life Below Water	- Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development
15	Life on Land	- Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss
16	Peace, Justice and Strong Institutions	- Promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels
17	Partnerships for the Goals	- Strengthen the means of implementation and revitalize the global partnership for sustainable development

자료: UN General Assembly Sustainable Development Goals

- SDG 1(빈곤 감소) & SDG 2(기아종식)
  - 부지의 거버넌스와 지속가능한 토양의 관리와 직접 연계
  - 토양의 농업적 이용과 이로 인한 토양질의 저감, 황폐화, 국제적인 규모에서의 식량 안전과 연결 (SDG 2.4 By 2030, ensure sustainable food production systems and implement resilient agricultural practices that increase productivity and production, that help maintain ecosystems, that strengthen capacity for adaptation to climate change, extreme weather, drought, flooding and other disasters and that progressively improve land and soil quality)
- SDG 3(건강한 생활과 복지)
  - 환경오염으로부터의 위험 감소 및 건강한 생활 (3.9 By 2030, substantially reduce the number of deaths and illnesses from hazardous chemicals and air, water and soil pollution and contamination)
- SDG 7(적정하고 깨끗한 에너지) & SDG 13(기후변화와 대응)
  - 토양에서의 바이오매스의 역할과 에너지 수요, 기후변화를 완화하기 위한 탄소의 포획 이슈와 연결
- SDG 12(책임있는 소비와 생산)
  - 토양의 보호(12.4 By 2020, achieve the environmentally sound management of chemicals and all wastes throughout their life cycle, in accordance with agreed international frameworks, and significantly reduce their release to air, water and soil in order to minimize their adverse impacts on human health and the environment)
- SDG 15(육상 생태계) & 16(평화적이고 정의로운 강력한 제도)
  - 지속가능한 토지의 관리 (Sustainable land management, SLM)은 사막화 방지와 지속가능한 농업 수단의 증진(15.3 By 2020, combat desertification, restore degraded land and soil, including land affected by desertification, drought and floods, and strive to achieve a land-degradation-neutral world)
  - 기후변화는 홍수, 가뭄, 토양의 황폐화 촉진
  - 자원의 사용은 경제, 환경, 사회적인 요소와 반환(returns)을 고려해야 함
- 지하수는 지구상에 존재하는 가장 큰 규모의 담수자원으로, SDG에는 지하수를 포함하는 물 관리에 대한 이슈가 모든 목적에 반영되어 있고, 모든 목적을 아우르는 교차이슈에 대해서는 하나의 목적(SDG 6-깨끗한 물과 위생)을 구성하고 있다. 이 외에도 8개의 목적에

지하수가 연계되어 있다. SDG에 따르면, 물은 ① 안전하고 저렴한 식수 공급, ② 오염물질(쓰레기, 유해 화학물질, 금속물질) 감축 및 안전한 재사용과 재활용 증가, 폐수 감축 등에 의한 수질 개선, ③ 물 이용 증대, 물 부족 해소, 담수의 공급과 지속적인 양수 보장, ④ 국가간 협력을 통해 모든 수준의 통합 수자원 관리 구현, ⑤ 수생태계의 지속가능한 서비스 보장 등을 목표로 하고 있다 (UN SDG, 2017).

- SDG 2(기아종식)

- 식량 생산성과 생산의 증대, 생태계 유지, 기후변화, 기상이변, 가뭄, 홍수, 기타 자연재해 대비 대응력 강화, 토지와 토질의 점진적 향상을 위한 농업 관리와 관련(SDG 2.4 By 2030, ensure sustainable food production systems and implement resilient agricultural practices that increase productivity and production, that help maintain ecosystems, that strengthen capacity for adaptation to climate change, extreme weather, drought, flooding and other disasters and that progressively improve land and soil quality)

- SDG 5(양성 평등)

- 상황에 따라 지하수의 공공서비스, 사회기반시설의 공급과 책임 공유를 통해 무급 노동에 대한 가치를 부여하고 인식 제고 (5.4 Recognize and value unpaid care and domestic work through the provision of public services, infrastructure and social protection policies and the promotion of shared responsibility within the household and the family as nationally appropriate)

- SDG 7(적정하고 깨끗한 에너지)

- 재생에너지, 청정에너지 연구와 기술에 대한 접근을 촉진하기 위한 국제적 협력 강화, 에너지 기반시설과 청정에너지 기술에 대한 투자 증진(7.a By 2030, enhance international cooperation to facilitate access to clean energy research and technology, including renewable energy, energy efficiency and advanced and cleaner fossil-fuel technology, and promote investment in energy infrastructure and clean energy technology)

- SDG 11(지속가능한 도시와 공동체)

- 빈곤층과 취약계층 보호에 중점을 두고, 사망자 수 및 피해자 수를 상당히 감축하고, 물 관련 재난을 포함하여 재난에 의해 발생하는 국내총생산 대비 직접적인 경제적 손실을 상당량 감축(11.5 By 2030, significantly reduce the number of deaths and the number of people affected and substantially decrease the direct economic losses relative to global gross domestic product caused by disasters, including water-related disasters, with a focus on protecting the poor and people in vulnerable situations)

- SDG 13(기후변화와 대응)

- 모든 국가에서 기후 관련 위험과 자연재해에 대한 회복력 및 적응력 강화(13.1 Strengthen resilience and adaptive capacity to climate-related hazards and natural disasters in all countries)
- 기후변화 조치를 위한 국가 정책, 전략 및 계획에 통합(13.2 Integrate climate change measures into national policies, strategies and planning)

- SDG 14(수생태계)

- 해양쓰레기 및 영양염류 오염을 포함하여 특히 육지 기반 활동으로부터 발생하는 모든 종류의 해양오염 예방과 감축(14.1 By 2025, prevent and significantly reduce marine pollution of all kinds, in particular from land-based activities, including marine debris and nutrient pollution)
- 해양·연안 생태계를 지속가능하게 관리·보호(14.2 By 2020, sustainably manage and protect marine and coastal ecosystems to avoid significant adverse impacts, including by strengthening their resilience, and take action for their restoration in order to achieve healthy and productive oceans)

- SDG 15(육상생태계)

- 국제협정 하의 의무에 따라 육지·내륙 담수생태계 및 그 서비스, 특히 산림·습지·산건조지의 보존, 복원 및 지속가능한 이용 보장(15.1 By 2020, ensure the conservation, restoration and sustainable use of terrestrial and inland freshwater ecosystems and their services, in particular forests, wetlands, mountains and drylands, in line with obligations under international agreements)
- 사막화 방지, 사막화·가뭄·홍수의 영향을 받은 토지를 포함한 황폐화된 토지와 토양을 복구하여, 토지황폐화 중립 달성(15.3 By 2030, combat desertification, restore degraded land and soil, including land affected by desertification, drought and floods, and strive to achieve a land degradation-neutral world)

- SDG 17(지구촌 협력)

- 상호 합의에 의해 개발도상국의 청정기술 및 친환경기술의 개발, 이전, 보급, 활용 증진 (17.7 Promote the development, transfer, dissemination and diffusion of environmentally sound technologies to developing countries on favourable terms, including on concessional and preferential terms, as mutually agreed)
- 지속가능발전목표 이행을 위한 개발도상국의 국가계획 지원을 위한 역량강화를 이행하

며, 이를 위한 국제사회의 지원 강화(17.9 Enhance international support for implementing effective and targeted capacity-building in developing countries to support national plans to implement all the Sustainable Development Goals, including through North-South, South-South and triangular cooperation)

- 지하수 관련 다양한 이해관계자간 파트너십 구축 및 증진(17.16, 17.17)

## (나) 생물다양성협약 (CBD, Convention on Biodiversity)

### ① 토양

- 생물다양성협약(CBD, Convention on Biodiversity)과 UN 세계식량기구(FAO, Food and Agriculture Organisation)를 포함한 관련 UN 기구에서 토양보전에 관한 교육 및 홍보, 기술협력 등에 관한 정책 및 기술 협력 논의가 진행되고 있다.
- 생물다양성 협약의 제6차 당사국 회의(2002, 나이로비)는 토양의 생물다양성 보전과 지속 가능한 이용을 당사국 회의의 주요 핵심 이슈로 선정하였고, UN의 세계식량기구를 포함한 관련 기구를 초청하여 주제에 관련한 토양의 생물다양성이니셔티브(SBI, Soil Biodiversity Initiative)를 수립하는 것을 결정했다.
- FAO와 EMBRAPA-SOYBEAN은 주제 관련한 워크숍(International Technical Workshop on Biological Management of Soil Ecosystems for Sustainable Agriculture, 2002년 브라질 론드리나)을 개최하였고, CBD와 공동으로 FAO의 지속가능한 농업과 식량안보에 관한 의무사항을 결정했다.
- SBI는 첫째, 토양의 생물다양성 주요기능과 농경방법에 따라 나타나는 농업-생태 및 사회경제적 영향에 대한 인식제고, 지식과 이해를 증진과 둘째, 통합적인 토양의 생물학적 관리 방법을 이행하는 농부에 의한 농경방법의 채택과 이들 농부에게 농경지의 소유 권리를 제공해야 함을 목적으로 하고 있으며, 관련 이해당사자들과 관련조직의 협력 증진, 토양의 건강성과 농업과 토지의 관리, 훼손된 토양을 복원하기 위해 토양의 생물학적 관리를 주요 정책 수단으로 하고 있다.
- 이후 이 주제는 CBD의 과학기술자문기구(SBSTTA, Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice)에서 논의되어 토양의 생물다양성과 지속가능한 농업(Soil Biodiversity and Sustainable Agriculture)을 마련하여 FAO에 제출된다.
- 그 외 SBI의 두 개 목적을 달성하기 위해 토양의 질을 향상시키기 위한 토양평가, 모니터링, 토양생물다양성의 생태계서비스 가치를 생활경제의 가치에 반영하는 '생물다양성의

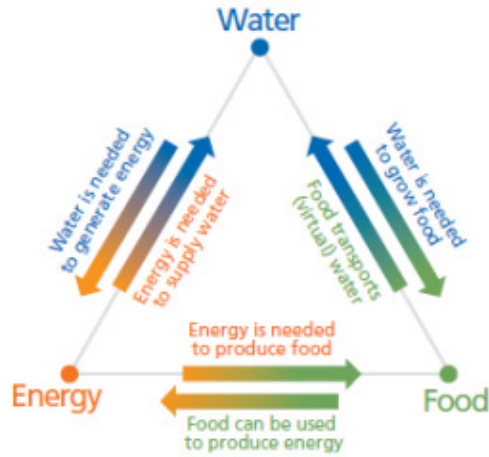
주류화 정책’에 대해 Tropical Soil Biology and Fertility of the International Centre of Tropical Agriculture(TSBF-CIAT), Institut pour la Recherche et le Developement(IRD), CAB International을 포함한 다양한 관련 국제 및 학술, 민간 조직들과 공동으로 논의 및 인식증진 사업을 진행하고 있다 (박용하, 2012 재인용).

## ② 지하수

- 육수(하천, 호소, 지하수 등)와 관련된 생태계의 보호에 관한 이해와 지식의 제고가 CBD에서 논의되고 있다.
- 지하수 이용으로 인한 접경 국가의 수생태 영향 등에 대한 국가간 협력에 대해서 주로 논의된바 있다.

### (다) 넥서스 접근 (Nexus approach)

- 넥서스 접근(Nexus Approach)은 환경 자원간의 상호 관계성과 상호 종속성, 그리고 공간과 요소간의 환경 자원의 이동과 변화를 통찰하여 접근하는 것이다.
- 넥서스 접근에서는 개별 요소보다는 자연환경의 복합적인 체계의 기능, 생산성과 관리를 고려하는 것이다 (UNU-FLORES, 2015).
- UNU-FLORES (2015)는 물, 에너지, 식품간의 관계를 다음의 도식화된 관계에서 상호 연계 및 종속되어 있음을 제시하고 있다 (그림 3-71).

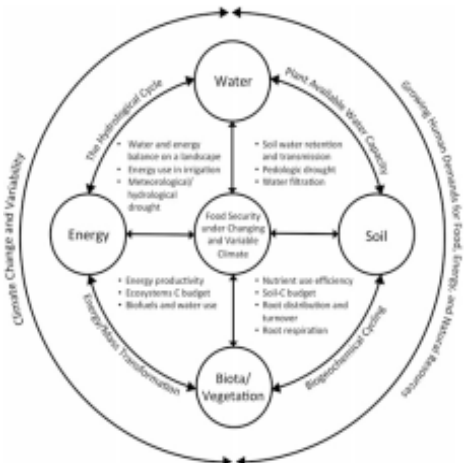


자료: UNU-FLORES (2015)

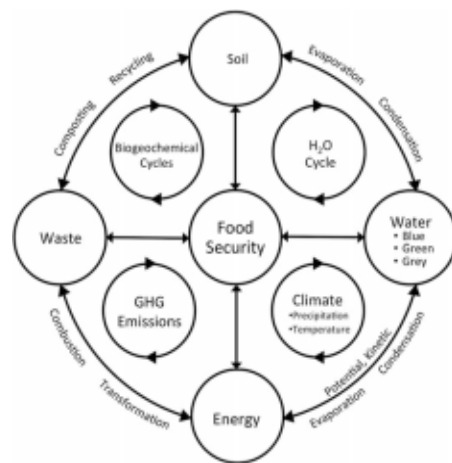
<그림 3-71> 물, 에너지, 식품 안보의 넥서스 접근

- 토양의 보전과 지속가능한 이용은 다른 환경매체와의 완전한 통합적인 고려와 이행을 통해 이루어지며, 이는 넥서스 접근의 기본 체계이다.
- 자연자원과 인간의 복지는 독립적 관계가 아닌 종속적인 관계이며, 자연에서 각 요소간의 연계와 지속가능한 자연자원의 이용에 관한 넥서스 접근은 자연자원 요소들의 종합적이고 통합적인 접근이나, 이를 정책으로 연계시키기 위해서는 접근에 대한 이해와 지식, 이를 뒷받침할 수 있는 합리적인 해설로 연결하는 수단과 방법이 수반되어야 한다 (Lal, 2015).

a



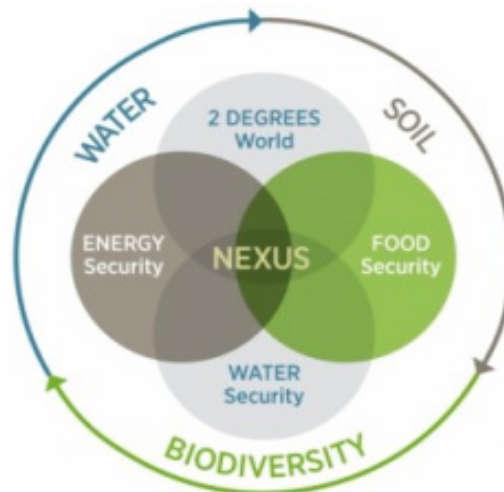
b



주: a, 식량안보-지속가능성-자연자원의 이용과 복원력. b, 식량안보와 토양질의 넥서스 연관 체계  
자료: Lal, 2015

<그림 3-72> 기후변화에 따른 식량안보에 영향을 주는 토양-물-에너지-작물 넥서스 연관 체계

- 한편 넥서스 접근은 생물적인 수단(토양, 나무, 습지, 바다 등) 또는 공학적인 수단(지질학적 포획)을 통해 대기 중의 이산화탄소를 포획하는데 강력한 개념으로 등장했다.
  - 예를 들면, 넥서스 접근은 현대적 또는 고전적인 지질학적 이산화탄소의 포획, 그리고 이산화탄소의 포획과 방출에 대한 토양과 기후변화의 기능을 평가하는 데 활용할 수 있다 (Puget et al., 2005).
- 넥서스 접근은 UN SDG에서 주창하고 있는 인류의 빈곤을 타파하며, 생태계 관리, 자연자원에 대한 투자와 다양한 생태계서비스의 제공함으로써 인류 사회에 전반적인 이익을 높여주며, 이를 통해 지속가능한 사회의 능력형성을 제고하며 공공인식을 증진하는 경제적 수단으로 인식하였다.
  - Hoff(2011)는 넥서스 접근을 지속가능하며 빈곤을 퇴치하는 수단으로 보고 있다.
    - SDG에서 토양, 물, 식량, 생태계, 생물다양성, 에너지 등의 이슈는 복합적이고 다양한 측면에서 엮여 있다.
    - 예를 들면, 토양과 물은 여러 요소와 부문을 포함하는 수평축에 해당. 빈곤, 물, 에너지, 식량, 기후안보를 결정하는 정부와 의사결정기구들은 수직축에 해당한다. 이 양축 요소들을 종합적으로 고려하는 거버넌스가 이루어져야 한다 (Müller, 2015).



자료: IASS (2015)에서 재인용; Müller (2015)

<그림 3-73> 넥서스 접근에서의 기후변화, 토양, 물, 생물다양성의 연계

- UNEP(United Nations Environment Programme, 2011)에서 의미하는 녹색경제란 넥서스 접근과 다르지 않다.

- UNEP(2011): Green Economy is an economy that results in improved human well-being and social equity, while significantly reducing environmental risks and ecological scarcities. Its carbon output and pollution is low, and its resource use efficiency is high. In a Green Economy natural capital is valued as a critical economic asset and as a provider of benefits for the poor. The Green Economy approach ‘seeks, in principle, to unite under a single banner the entire suite of economic policies (...) of relevance to sustainable development
- 다만, 녹색경제가 성공적으로 진행하기 위해서는 물, 에너지, 식량안보와 인간의 권리 등에 대한 부문적인 해답과 행위 이상으로 접근해야 하므로, 실제 넥서스 접근을 이행하는 지식, 방법과 수단에 있어서는 상당한 현실적 괴리(차이)는 있다 (Weigelt et al., 2015a).
- 지하수 분야에서의 넥서스 접근의 예로, 독일연방지질자원연구소는 통합 수자원 관리의 개념에서의 지하수를 물, 에너지, 식량 안보(food security) 사이의 넥서스 접근을 수행하고 있다 (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. 2017).
- 지하수 자원이 관개 수요를 충족시킬 때
- 인도는 지하수 이용의 측면에서 식량 - 관개 - 에너지 사이의 넥서스 접근을 수행 한바 있다 (Mukherji, 2017).

#### (4) 주요 OECD 국가 등의 토양·지하수환경보전기술과 산업수요, 전망

##### (가) 미국

##### ① 토양

##### ㉠ 토양환경보전기술

- 부지평가 기술을 원천기술로 인식하고 있으며, 실시간 오염부지의 정보를 제공하여 오염 비용 절감하고 있고, 국가차원에서 지역정화 추진, 유해물질 및 긴급사고 대처, 2018년까지 지역사회 잠재 위해지역 부지 검사완수 및 기존 오염부지의 국가 정화 평가기준 달성 추진하고 있다 (EPA, 2014).
- 2013년 8월 행정명령(Executive Order) 통해 유해시설 관리 방안을 제시했고, EPA는 ‘24시간 비상센터’ 운영 통해 화학사고를 대처하고 있다 (EPA, 2013).
- 미국은 슈퍼펀드 프로그램을 통해 다수의 오염 정화 기술이 실증화 상태이며, 최근에는

천연 광물자원 이용 오염물 흡착 기술, 생물학적 정화 기술 개발에 주력해왔다.

- 미국 EPA의 ORD(Office of Research & Development)에서는 부지특성화 연구 통해 현장 특성에 따른 오염모델링 및 최적 복원 기술 연구하고 있다.
  - 부지평가 기술을 원천기술로 인식하고 있으며, 실시간 오염부지의 정보를 제공하여 오염 비용 절감하고 있다.
- 호수 및 바다의 유류 유출 평가 모델링, 리스크 관리전략 등 사전 예방적 성격의 연구 진행함. 사이트특성화 및 복원효과에 대한 결과 도출 과정에 사용되는 데이터 타당성 평가 등의 통계 소프트웨어를 연구해왔다.
- 슈퍼펀드의 프로그램 모니터링 및 측정 기술 프로그램(MMT Program)은 검출, 모니터링, 유해물질 및 독성물질 측정 통해 부지평가, 모니터링에 실시간 데이터를 제공하여 복원 비용을 절감하는 것이다.

#### ㉠ 토양환경보전 관련 산업

- 미국 토양 오염방지 시장은 공공시장 중심으로 형성되어 있고 2010년 기준 7,753 백만 달러 규모이며, 복원 프로젝트(Remediation Construction)가 다수이다.
- 토양, 지하수 업체 중 대형 회사가 60% 이상을 차지하고 있으며 2008년 기준 업체의 매출은 약 13,000백만 달러이다.

### ② 지하수

#### ㉡ 지하수환경보전기술







- EBI는 환경산업을 크게 환경서비스, 환경장비, 환경자료, 환경소비재 4가지로 구분하고 있다 (EBI, 2015).
- 이를 바탕으로 기업이 제공하는 사업유형을 표준산업분류의 체계에 따라 환경테스트·분석서비스, 폐수처리 등 17개 세부분야로 구분하고 있다.
- 그러므로 환경매체별로 구분된 토양지하수산업의 환경분류에 직접적으로 참고할 수 있는 부분은 없음. 다만 토양지하수산업이 환경산업의 세부산업이므로 토양지하수산업의 범주 구분에 참고할 수 있다.
- 미국 토양 오염방지 시장은 공공시장 중심으로 형성되어 있고 2010년 기준 7,753 백만 달

러 규모이며, 복원건축 프로젝트(Remediation Construction)가 다수이다.

- 미국의 토양·지하수 정화시장은 공공시장 중심으로 형성되어 있으나, 브라운필드 등 민간 부분의 토양·지하수 정화시장이 지속적으로 성장하고 있는 추세이다.
- 최근 공공부문 이외에 브라운 필드 등 민간부분의 토양·지하수 정화시장이 전체 토양·지하수 정화시장 비중의 30% 이상을 차지하며 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타난다.

#### ㉔ 지하수환경보전 관련 산업

- 미국의 토양, 지하수 업체 중 대형 회사가 60% 이상을 차지하고 있으며 2008년 기준 업체의 매출은 약 13,000백만 달러에 달한다 (한국환경산업기술원, 2014).
- 미국의 토양·지하수 관련 환경업체는 2008년 기준으로 494여개의 회사가 있으며 매출액 1억 달러 이상인 대형회사는 30여개에 불과하지만 이들이 전체 시장의 약 60% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타난다.
- 사업영역에서는 건설, 엔지니어링 부문의 사업들과 공동으로 진행되는 형태를 보이고 있으며, 토양·지하수 정화전문기업의 대내외 경쟁력 확보를 위해서는 정화분야 이외에 엔지니어링, 토목, 건설 등으로 사업영역의 확대가 필요한 상황이다.

<p><b>■ URS Corp</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 10,086백만\$</li> <li>- 정화부분 매출액 : <b>52백만\$(7.5%)</b></li> <li>- 사업내용 : 정부시설 / 기반시설 / 산업시설, 전력(발전소 건설, 송전, 배전) 분야 엔지니어링 및 건설</li> </ul>	<p><b>■ Shaw Group</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 6,998 백만\$</li> <li>- 정화부분 매출액 : <b>685백만\$(9.8%)</b></li> <li>- 사업내용 : 전력, 환경 및 기반 시설, 에너지 및 화학 등 분야 엔지니어링 및 건설, 철강 제조</li> </ul>	<p><b>■ PARSONS</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 3,439 백만\$</li> <li>- 정화부분 매출액 : <b>669 백만\$(19.5%)</b></li> <li>- 사업내용 : 통신, 교육, 에너지, 환경, 정부시설, 교통, 수자원 등 분야 엔지니어링 및 건설</li> </ul>
<p><b>■ CH2M Hill</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 6,424백만\$</li> <li>- 정화부분 매출액 : <b>592백만\$(9.2%)</b></li> <li>- 사업내용 : 에너지, 환경, 기반 시설, 자원, 교통, 수자원 분야 엔지니어링 및 건설</li> </ul>	<p><b>■ Jacobs Engineering</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 11,252백만\$</li> <li>- 정화부분 매출액 : <b>485백만\$(4.3%)</b></li> <li>- 사업내용 : 국방, 자동차, 화학, 제지, 에너지, 환경, 기반시설, 광산, 제약 분야 엔지니어링 및 건설</li> </ul>	<p><b>■ Bechtel Group</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 31,400 백만\$</li> <li>- 정화 매출액 : <b>444백만\$(1.4%)</b></li> <li>- 사업내용 : 공항, 항만, 통신, 국방, 환경, 발전소, 광산, 철강, 오일, 가스, 도로, 철도 분야 엔지니어링 및 건설</li> </ul>

<그림 3-74> 미국 토양·지하수 주요 오염정화기업 현황

## (나) 유럽

### ① 토양

#### ㉠ 토양환경보전기술

- 토양 오염 자체에 집중하기 보단 생태적 관리 통한 사전예방, 타 환경 분야와 연계한 통합 관리 등을 적용하고 있고, 토양오염을 국지적으로 보기보다는 ‘식량’, ‘기후변화’의 문제와 연계시키고 있으며 ‘지속가능한 농업기술’ 및 ‘이산화탄소 저장고로써의 토양기능’에 집중하고 있으며, 특히, 생태적다양성모니터링, 통합적인 접근 방식, 비점오염원의 관리 등에 주목하고 있다.
  - 기후변화와 연계하여 토양·지하수 오염의 생태기반 관리를 추진하고 있으며 정보공유 위한 네트워크 구축
  - 전 유럽 차원의 주요 상위계획은 토양·지하수 오염을 포함한 기후변화 대응을 위한 전략 및 실천 계획을 수립(EU, 제7차 환경행동계획(Horizon 2020, The Life Programme))
- 스페인은 1991년부터 1995년까지 토양, 지하수 오염원 국가 인벤토리를 구축 통해 약 18,000개 산업부지의 오염개연성을 파악하였고, 이 중 5,000개 부지를 잠재오염부지로 선정하여 국가 인벤토리에 포함하여 관리(1997년까지 370개부지 오염 확인)
- 오스트리아는 1989년부터 국가 차원에서 토양, 지하수 인벤토리를 구축하여 관리하고 있다.
- 핀란드는 1990년부터 1992년까지 잠재오염원을 등재한 후 지속적으로 DB를 갱신하고 있다. 잠재오염원을 4가지로 등급화한 후 오염의심부지에 대한 우선관리 실시하고 있다.
- 토양, 지하수 환경 지도를 구축하여 활용하고 있다. 확률론적 지하수 오염취약성 평가기법을 이용하여 지하수 내 비소, 불소 등 오염예측에 활용하고 있다

#### ㉡ 토양환경보전 관련 산업

- 잠재적으로 3.5백만 부지(site)가 오염 정화가 필요한 상태이므로 향후 시장은 더 커질 것으로 사료되며 독일, 프랑스, 네덜란드 기업이 역동적이다.
  - 유럽의 0.5백만 사이트가 정화가 필요한 상태이고, 3.5백만 사이트가 잠재적인 오염 토양인 것으로 알려졌다.
- 국가별로는 평균 매출(Average Turnover) 및 기업체수를 고려했을 때, 이탈리아, 영국, 프랑스, 독일 등의 시장이 역동적이다.

- 유럽의 토양 및 지하수 관련 2010년 고용은 21,029 수준이고 CAGR이 46%로 높은 시장 성장률과 고용 기여 효과를 알 수 있다.

## ② 지하수

### ㉞ 지하수환경보전기술

- 유럽 지역에서 토양 복원을 위해 각 국의 부지특성에 따라 기술을 적용하고 있으며 주로 생물학적 처리·화학적 처리 기술이 활용된다 (한국환경산업기술원, 2015).
- 유럽 각 국별로 토양 정화 기술 이용 동향을 살펴보면, 각 국의 부지특성(site-specific)에 걸맞은 기술을 이용하고 있는 것으로 보이며 비교적 생물학적 처리(Biological Treatment)와 화학적 처리 기술(Chemical Treatment)이 빈번하게 사용되고 있다.
- 네덜란드는 원위치(In-situ) 처리법을 주로 사용하는 국가로 그 중에서 말타는 원위치 물리화학기법(In-situ Physical/Chemical Treatment) 약 60%, 원위치 열적 기법(In-situ Thermal Treatment) 약 40%로 원위치 공법만을 적용하고 있다.
- 네덜란드는 원위치 생물학적 처리(In-situ Biological Treatment)와 원위치 물리화학적 처리(In-situ Physical/Chemical Treatment)가 전체 적용공법의 70%정도 적용하고 있다.
- 에스토니아, 핀란드, 프랑스의 경우 탈위치(Ex-situ) 처리법을 주로 사용하고 있으며, 에스토니아의 경우 탈위치·부지의 생물학적 처리법(Ex-situ/Off-site Biological Treatment) 적용비율 95%이상이고 핀란드와 프랑스는 단순 굴착법(Ex-situ excavation), 헝가리는 탈위치·부지의 열적처리법(Ex-situ Thermal Treatment)이 50%까지 적용한다.
- 조사된 13개 유럽연합국 중 6개 국가(호주, 이탈리아, 리투아니아, 노르웨이, 슬로바키아, 영국)는 기타 처리법(Other Soil Treatment)이 주로 적용되고 있으며 특히 영국의 경우 동 처리기법이 90%이상을 차지하고 있다.

### ㉟ 지하수환경보전 관련 산업

- 잠재적으로 3.5백만 부지(site)가 오염 정화가 필요한 상태이므로 향후 시장은 더 커질 것으로 사료되며 독일, 프랑스, 네덜란드 기업이 역동적이다.
- 유럽의 0.5백만 사이트가 정화가 필요한 상태이고, 3.5백만 사이트가 잠재적인 오염 토양으로 벨기에, 덴마크, 영국, 등의 잠재 오염 지역이 넓다.

- 유럽에서 토양지하수정화시장을 선도하고 있는 대표적인 기업은 독일의 Bilfinger Berger, 프랑스의 Sita, 네덜란드의 Arcadis, 프랑스의 Veolia Environment 등으로 강력한 토양·지하수 보호정책을 추진하고 있는 국가의 기업들이 주를 이루고 있다.

<p>■ Veolia Environment </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 35,090백만€</li> <li>- 사업내용 : 수자원(물 및 하수 관리, 공공작업 설계 및 구축), 환경(쓰레기 처리, 도시청소, 토양 및 현장 정화, 수집, 분류, 이송, 리사이클링/복원), 에너지(에너지 및 냉난방, 빌딩관리시스템, 기후 제어 및 전력), 여객 수송</li> </ul>	<p>■ Arcadis </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 1,740백만€</li> <li>- 사업내용 : 기반시설(교통량, 도로, 고속도로, 철도, 수로, 다리, 터널, 토지개발, 발전소, 채굴), 수자원 및 하수처리, 환경(토양 지하수 오염 정화, 폐기물 처리, 생태계 복원), 건물 시공 및 도심 개발</li> </ul>
<p>■ Sita France(Suez-Environment) </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 12,364백만€</li> <li>- 사업내용 : 물(식수 생산 및 공급망 관리, 플랜트 설계/건설/운영, 폐수 처리, 담수화, 하수슬러지 복원), 쓰레기(수집, 분류, 처리, 재활용, 소각 및 매립, 오염정화 및 토양복원, 슬러지 처리 및 복원)</li> </ul>	<p>■ Bilfinger berger </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2008년 매출액 : 10,742백만€</li> <li>- 정화전문 자회사(Bilfinger Berger Umwelttechnik) 매출액 : 226백만€(2.1%)</li> <li>- 사업내용 : 산업 플랜트, 전력(발전소 부품제조, 플랜트 엔지니어링), 건물 및 시설 설계/건축/관리, 기반시설</li> </ul>

<그림 3-75> 유럽 토양·지하수 주요 오염정화기업 현황

## (다) 중국

### ① 토양

#### ㉞ 토양환경보전기술

- 토양오염으로 인한 지하수 및 음용수 오염의 개선에 집중하고 있으며 2020년까지 국가통합관리체계 및 복원을 강화하는 것을 추세로 하고 있다.
  - 국가 상위 계획에 토양보호 활동을 포함시키며 토양정화 산업의 발전을 촉진하고 있다.
  - 중국 최상위 계획인 12.5계획(2011~2016년)은 토양 중금속 오염 방지 위한 계획 포함하며 토양 문제에 750억 위안을 투자했다.
  - 2013년 토양환경보호법을 추진, 토양오염방지복원센터 설립 등 토양오염 기술지원 및 서비스 발전을 촉진해왔다.
- 중국의 토양복원 기술은 연구 단계에 있으며 토양 검측 기준이 표준화 되지 않아 선진국 기준에 따르고 있으며 중국과학원에서 중금속 잔류량을 빠르게 검사할 수 있는 나노 복합

기술을 개발했다.

- 중국과학원은 나노척도 재료의 강흡착성, 활성이 높고 나노척도 재료처럼 뭉치지 않고 쉽게 분리되고 안정하게 순환 이용할 수 있는 등의 특성을 구비하고 있는 신형의 마이크로·나노구조재료를 연구 개발하여 중금속으로 오염된 토양의 벽침투반응과 복원 기술을 개발했다.

#### ㉠ 토양환경보전 관련 산업

- 중국 정부는 2020년까지 더욱 토양질을 개선할 것이라고 발표하면서 중국에서 오염된 토양을 복원하는 토양정화 산업이 환경분야의 블루오션으로 떠오르고 있으며 2030년까지 약 40조원 이상일 것으로 예측된다.
  - 중국 토양 복원시장에 참여하는 업체는 100여개 정도이고 대형 건설사 및 외국계 회사 주도로 시장이 분할되고 있는 것으로 보인다.
- 중국의 토양재생 기술은 연구 단계에 있으며 기업 수도 많지 않음. 토양 검측 기준 또한 표준화되지 않아 선진국 기준을 따른다.
  - 대표기업 : 北京建工环境修复公司, 杭州大地环保工程有限公司 등
- 현재 중국 내에서 진행되는 각종 토양재생 프로젝트에 외국 기업의 기술이 도입되었으며, 주요 진출 기업은 <표 3-57>과 같다.
- 발전 초기, 주도권 선점이 필요하다.
  - 중국 토양재생산업 시장이 지역 편중적이고 미약하나 빠른 성장이 전망됨에 따라 조속한 진출이 필요하다. 수처리 및 쓰레기처리 시설 시장은 발전 초기에 진출한 기업이 시장을 독점하고 있으며 토양재생산업도 비슷한 흐름을 띠 것으로 예상된다.
- 협력 기업 발굴
  - 중국 내 환경보호산업 관련 기업 및 기구와 협력관계를 맺으면 다양한 정보 획득이 가능하다. 특히 정부 유관기업과 협력할 경우 중요 프로젝트에서 경쟁력을 가질 수 있다.
- 도시 지역 공략
  - 산업이전 가속화에 따라 상하이, 장쑤성, 저장성 등 장강 삼각지구 및 대도시 지역의 오염 토양 재생 수요가 증가할 것이다.
  - 베이징지역은 산업 이전 후 잉여 용지의 무해화 산업을 진행하며 300억 위안 규모의 토양재생 시장이 함께 성장할 전망이다.

<표 3-57> 중국 토양재생 프로젝트 참여 외국기업

연도	국가	회사명	성공사례
2008년	독일	Bauhaus University of Weimar, DHC, D&H	- 장쑤성 환경과학연구원과 독일 Bauhaus University of Weimar, DHC사, D &H사가 '중-독 연합 토양재생공정센터'를 합작 설립
2009년	캐나다	ADVENTUS	- 캐나다 ADVENTUS사와 상하이 환경과학연구원이 합작 체결 - ADVENTUS사의 상품 및 기술 도입 중
2010년	프랑스	Suez Environment	- 프랑스 Suez Environnement와 湖南凯天环保科技股份有限公司가 협정 체결
	프랑스	Veolia Environnement	- 기존 오염처리 사업 분야 투자 확대 - 토양재생산업 진출
	한국	홍콩 SK 차이나	- 홍콩 SK 차이나와 青岛新天地投资有限公司가 6000만 위안 합작 투자 · 토양검측·재생, 환경보호 설비 수출 등 · 2011년 말 10만km <sup>2</sup> 규모 오염처리장 가동
2011년	호주	호주무역위원회	- 호주무역위원회와 주저우(株洲)清水塘循环经济工业园지가 합작 체결 · 잔여 중금속 폐기물 210만t 종합처리 · 가동중단상태 오염처리장 4.8km <sup>2</sup> 리모델링 · 카드뮴 오염지역 6km <sup>2</sup> 복원

자료 : 국가환경정보센터(中國環境市場動向, www.konetic.or.kr)

## ② 지하수

### ㉞ 지하수환경보전기술

- 2013년 8월 「에너지 절약·환경보호산업의 발전 가속화에 관한 의견」에 따라 환경오염처리에 위험 폐기물과 토양오염 관리 및 모니터링 장비 등 환경보호 기술과 장비관련 기술을 요구하고 있다 (한국환경산업기술원, 2015).
- 중국 지하수 탐사 기술은 외국에 비해 큰 격차를 보이기 때문에 탐사 기술 향상과 탐사 장비를 향상시키는데 초점을 맞추고 있다.
- 지하수 탐사에 있어 가장 중요한 센서(sensor)기술 응용이 낙후하여 지하수 자원 발굴에 어려움을 가지고 있고, 외국의 기기는 값이 비싸고 조작성이 복잡하며 프로그램이 번거로와 중국 지하수 탐사작업에 이용되지 못하고 있다.
- 중국 지하수 탐사의 수준을 높이자면 지하수 현장 분포에 대한 검측 기술을 발전시키는

것이 관건이고, 지하수 탐사를 위해 지하층에 뚫은 한 개 파이프에 여러 개 층의 수자원을 측정할 수 있는 독립적인 탐사 시스템 기술 등이 요구된다.

#### ㉔ 지하수환경보전 관련 산업

- 중국의 환경보호산업은 환보하이(環渤海), 창장삼각주, 주장삼각주 중심의 '연안 발전 벨트(沿海發展帶)'와 상하이에서 창장을 축으로 쓰촨 지역에 이르는 '연강발전 축(沿江發展軸)' 중심의 발전구도를 형성하고 있다.
- 중국 공공환경사무협회(the Institute of Public and Environmental Affairs. IPE)의 환경운동가인 마궈(馬軍)은 지방 사람들이 깨끗한 물을 얻기 위해 수백 혹은 수천 피트 지하까지 샘을 파고 있다. 지표수에 비해 지하수 오염관리는 한층 복잡하고 비용도 많이 드는 게 문제로 대두되고 있다.
- 중국정부는 농업 및 산업폐수로 인해 전국의 샘물과 지하수의 오염이 광범위하게 진행되고 있다는 사실을 인지하고 있다. 지난 2011년 중국 환경보호부는 오는 2020년까지 지하수 오염원을 차단하는 계획을 발표했다.
- 지하 공동화를 부르는 지하수 난개발도 시급한 대책을 필요로 하고 있다. 중국 환경보호부에 따르면 1970년대 중국의 한 해 지하수 사용량은 570억<sup>m</sup>³ 정도였다. 2009년에는 지하수 사용량은 1100억<sup>m</sup>³로 늘었다. 이는 중국 전체 물 사용량의 5분의 1에 해당하는 양이다. 중국 북부의 건조지역에서는 물 사용량의 3분의 2를 지하수로 충당한다.
- 지하수 오염 방지 계획(중국, 2011)에 따라 관련 법률의 강화
  - 지하수 오염 방지 계획의 통과로 향후 오수 처리 관련 구체적인 법률이 제정될 것이고, 배출 기준 또한 더욱 엄격해지고 있다.
  - 지하수 오염 실태에 대한 정확하고 구체적인 파악이 미약한 상황으로 전국적인 실태 파악이 선행될 것이므로 우선적으로 기존 법률에 대한 감시 및 집행이 강화될 것으로 전망된다.
  - 이에 따라 지하수 처리 강화를 위해 공업 집중 지역에 집중적으로 오수 처리를 장려하고, 공업폐수 처리기준을 향상시키는 기술시장을 요구한다.
  - 또한, 중소기업의 폐수 처리 시설 완비의 강화, 운영 투자 확대를 통해 기업이 규정에 맞는 배출을 하도록 엄격히 관리하고, 이를 통해 공업 폐수 처리에 집중하는 시장이 형성된다.

## (라) 일본

### ① 토양

#### ㉠ 토양환경보전기술

- 일본에서는 지상처리(ex-situ)법이 선호되며, 생물학적 방법도 2005년 환경성과 경제산업성에서 이 방법을 장려하면서 사용이 증가하는 추세이며, 사고시 토양·지하수오염 평가 기법을 위한 모델링이 국제적으로 개발 중이다.
- 2002년부터 토양오염 및 정화기술의 실용화하여 보급하기 위해 매년 ‘저비용·저부하형 토양오염조사대책기술 검토조사’를 실시해오고 있다.

#### ㉡ 토양환경보전 관련 산업

- 일본의 시장은 2007년 기준, 2,040억엔으로 추정되며 대기업 중심으로 시장과점화 현상이 보이고 있다.
- 현재 매출액 50억원 미만의 중소기업체들 중심으로 시장을 형성하고 있으나, 향후 미국이나 일본의 예와 같이 대기업들이 주도하는 시장으로 시장이 재편될 것으로 보인다.
  - 상위 10개사가 전체 시장의 67%를 점유하고 있음. 현재 국내 토양정화시장도 선도적인 5~6개사가 전체시장의 50% 이상을 점유하고 있는 것으로 추정된다.

### ② 지하수

#### ㉠ 지하수환경보전기술

- 일본에서는 지상처리(ex-situ)법이 선호되며, 생물학적 방법도 2005년 환경성과 경제산업성에서 이 방법을 장려하면서 사용이 증가하는 추세이다.
- ‘저비용·저부하형 토양오염조사대책기술 검토 조사’를 통해 기술의 실용화 확산을 추진하고 있으며, 잔류성 오염물질 무해화에 대한 기술 개발 등 추진하고 있다 (한국환경산업기술원, 2016).
- 일본은 우리와 마찬가지로, 정화기술에 초점을 두지만, 기후변화대응을 위한 지하댐 등 지하수함양과 지열개발 등 지하수 이용기술이 다양한 기술수요를 가지고 있다.

#### ㉔ 지하수환경보전 관련 산업

- ' 환경에의 대처를 엔진으로 한 경제성장을 위하여(環境への取り組みをエンジンとした経済成長に向けて) '는 토양, 수질정화 관련 서비스와 장치, 시설 분야를 합쳐 ' 11년 약 1,772억엔 정도의 시장 규모를 형성할 것이라고 보고 있다.
- ' 토양, 수질 정화용 장치·시설 '은 토양 정화 관련 분야로 ' 03년부터 형성된 신규 시장이며 '08년 이후 50억 엔 규모의 시장이 유지되고 있으며, ' 11년 고용규모는 173명으로 소규모이다.
- 일본의 토양·지하수 관련 기업은 대형 건설사(General Contractors; 이하 '제네콘')와 수처리 회사(Waste Treatment Firms)들이 주도하는 과점적 시장구조를 형성하고 있다.
- 상위 10개 회사가 전체 토양정화시장(매출액기준)의 66%를 점유하는 것으로 나타났으며 대형사들의 점유율 확대 추세가 지속되고 있다.

### (5) 토양·지하수환경 정책과 기술 흐름의 분석 및 평가

#### (가) 정책

##### ① 우리나라

- 우리나라에서 1980년대 이후 현재까지 추진하고 있는 토양·지하수 정책은 발전 및 확대되어, 최근에는 토양·지하수질을 저하시키는 위해요인 및 오염물질로부터 국민건강중심, 사전예방체계 구축, 합리적인 토양관리제도의 정착 및 이행, 토양·지하수의 연계관리, 토양·지하수 기술 선진화, 토양·지하수환경산업의 육성 및 국제협력에 초점을 두고 진행해 온 정책이다.
- 이를 통해 국내 오염부지의 조사 및 확인, 오염부지의 정화 등에 관련된 정책이 발전되었으며, 이를 이행하기 위한 법·제도가 지속적으로 발전되어 왔으나, 그간의 토양오염에 관련된 그간의 정책은 토양의 다양한 기능과 생태계서비스의 지속가능한 이용 측면을 고려하지 못하고 있다.
- 우리나라의 토양환경보전법 제1조(목적)에 명시하고 있는 토양환경보전의 목적인 “토양생태계의 보전” 을 이행하기 위한 정책이 이루어지고 있다고 보기 어렵다.
- 「토양환경보전법」 제1조(목적)에 이 법은 “토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고, 토양생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하

계 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 한다.” 고 명시되어 있으나, 현행법률 및 제도상에는 토양생태계의 보전 대상, 수단과 방법 등이 제시되어 있지 않는 등 토양 본래의 기능을 유지하기 위한 토양생태계 보전에 관련된 국가의 체계적인 정책은 시행되고 있지 않다.

- 오염부지 토양의 경우 오염물질만 제거 또는 감소시켜 부지정화를 완료한 것으로 판단하고 있어, 토양의 기능 향상, 생태적 가치 부여 및 보전 등 「토양환경보전법」에서 정한 기본 목적에도 부합되지 않고 있다.

○ 한편, 2013년 환경부는 토양생태계의 환경적 기능을 유지하기 위한 ‘표토보전 5개년 중합계획’을 수립하였으며, 표토의 대량손실을 유발할 수 있는 골프장, 산업단지 등의 인위적인 침식에 따른 표토유실을 방지하기 위하여 표토환경영향평가를 2016년부터 시행하기로 계획되어 있는 등, 최근 토양 생태계 서비스 기능을 보전하고 지속가능한 토양환경의 이용 정책이 제시되고 있는 등 토양의 생태계서비스 보전 및 지속가능한 이용에 대한 실마리가 나타나고 있다 (환경부, 2013).

- 우리나라에서 「토양환경보전법」에서 토양생태계의 관리 및 보전을 다루고 있지 못하고 있다.

- 이를 이행하기 위한 토양생태계의 기능과 생태계서비스 보전에 관한 토양환경보전정책 개념이 정책에 반영되어 있지 않으며, 이에 따라 토양의 생태계서비스 관련된 과학적인 지식과 정보, 그리고 정책의 이행 수단과 방법이 미비되어 있기 때문이다.

- 「토양환경보전법」에 토양생태계를 관리 및 보전하기 위한 토양생태계의 보전 및 지속가능한 이용에 대한 개념, 보전대상과 범위, 위해요인 및 정도, 정책 이행 수단과 방법 등이 마련되어야 한다.

○ 그간 우리나라가 추진해 온 토양·지하수의 기술·산업 부문에서의 발전은 토양·지하수 정화산업시장을 대상으로 이뤄진 것으로, 우리나라의 토양·지하수오염방지기술개발사업(2008~2017)을 통해 국내 기술력이 선진기술 대비 74% 수준까지 향상된 것으로 평가하고 있으나 (환경부, 2015), 토양오염부지의 정화 및 정화토양에 대한 사후관리 법적 근거 부재, 폐광산 주변지역 광해방지사업 사후 관리체계 미흡, 지하수 오염에 대한 체계적인 정화제도 미흡, 지질·유역·대수층 단위의 장기적 지하수 수질관리의 부재, 지하수 수질기준 설정 및 개발가능량 산정에 있어 하천 수생태환경의 지표수-지하수 연계가 고려되지 않는 등 문제를 안고 있다.

- 토양·지하수의 기술·산업 부문에서도 토양 및 지하수의 기능과 생태계서비스의 보전 및 지속가능한 이용을 위한 기술·산업개발이 거의 이뤄지고 있지 않다.

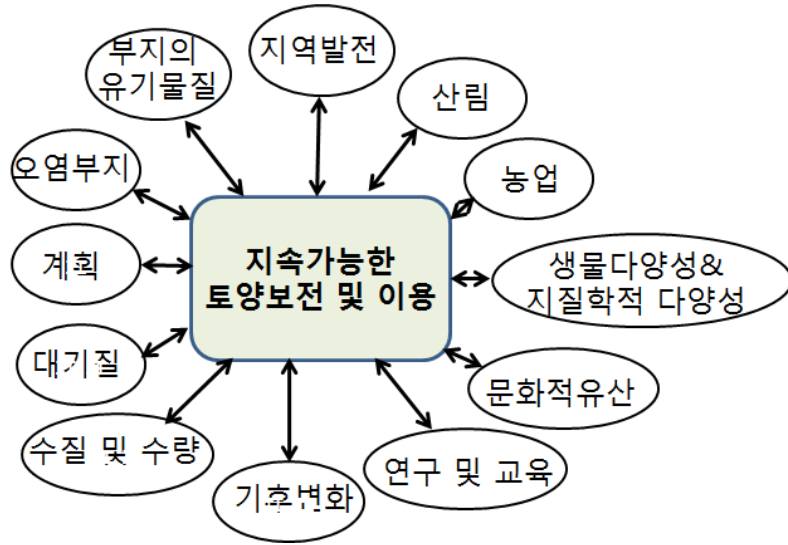
○ 우리나라의 경우, 토양의 기능과 생태계서비스를 보전 정책은 EU와 비교하면 매우 낮은

단계에 있다.

- 기존의 생물다양성 법률 및 계획의 경우, 토양생물다양성과 생태계의 복원능력, 다양한 생태계서비스의 제공 등이 전혀 반영되어 있지 않다.
- 우리나라 정부의 정책을 수립하고 결정하는 과정에 정책입안자와 전문가들이 토양의 생물다양성, 토양생물다양성의 생태계서비스 가치를 충분히 인식하지 못하였기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 토양생물다양성 보전정책의 필요성 홍보와 관련 프로젝트의 수립과 단계별 진행이 필요하다.

## ② 주요 OECD 국가 및 중국

- 영국, 독일, 네덜란드, 오스트리아 등의 OECD의 주요 선진국과 미국은 1990년대 이후 토양·지하수의 주요한 위협요인을 토양오염, 토양침식, 유기물질의 감소, 토양의 다짐, 토양의 산성화·염화, 표토의 차폐, 생물다양성 감소 등으로 간주하고 있으며, 이러한 위협요인으로 토양·지하수의 기능과 생태계서비스를 보호하기 위해 토양오염의 예방 및 오염부지의 정화 뿐 아니라 토양침식 방지, 유기물질의 감소, 토양의 다짐 방지, 염화 방지, 표토의 차폐 방지, 생물다양성 보전 및 지속가능한 이용 정책을 수립하고 이행하고 있다.
- 유럽연합(EU)의 2002년 제6차 환경이행프로그램(The 6th Environment Action Programme)과 2013년 제7차 환경이행프로그램(The 7th Environment Action Programme)에서 토양을 여러 자연환경 매체에 연결되어 있으며, 6개의 원칙(환경과 사회적 고려에 대한 균형, 세대간의 평등, 세대 내에서의 평등, 환경적 한계, 공공의 참여, 협치)하에 토양에 대한 독립적인 보전정책보다는 다른 매체들과 연결된 통합적인 정책으로 접근하고 있음을 주시할 필요가 있다.
- 토양을 위협하는 요인은 국가의 지질, 지형, 지향정책, 토양의 이용 형태 등에 따라 위협요인이 국가별로 다르며, 접근 방법도 다르게 나타나고 있다. 예를 들어, 스코틀랜드의 경우 토양의 기능을 위협하는 가장 높은 우선순위로 기후변화를 두고 있으나, 이는 유럽의 국가별로 다름. 독일의 경우 토양오염과 차폐방지 등이 우선순위 높으며, 침식의 우선순위는 낮다.



자료: Scottish Government(2009)

<그림 3-76> OECD 주요 선진외국에서 추진하고 있는 토양보전을 위한 주요 정책 분야

높음 ↓ 낮음	기후변화 유기물질의 손실 차폐 산성화와 부영양화 생물다양성의 손실 중금속 등에 의한 오염
	토양침식 농약 다짐과 구조 염화

자료: Scottish Government(2009)

<그림 3-77> 스코틀랜드 토양기능의 위협요인 순위

- 미국, 영국, 독일 등 OECD 대부분의 국가에서는 토양·지하수의 보전과 지속가능한 이용이 국가의 발전과 안보(국민의 건강과 생산성)를 위한 핵심 요소로 인식되고 있으며, 토양의 보전을 위한 국가의 전략과 수단에 관련된 요인을 통합적으로 연계하여 국가의 계획에 반영하여 이행하고 있다.
- EU는 유럽 전역의 토양의 상태를 확인할 수 있는 CORINE programme를 1985년부터 이행하고 있으며, UNEP은 GLASOD(Global Assessment of Soil Degradation)를 1991년부터 운용하

면서 세계적인 토양의 질을 측정하고 토양의 훼손 정도를 관측하고 평가하기 시작했다 (GLASOD, 2015; Sonneveld and Dent, 2007).

- GLASOD는 UNEP(UN Environment Program)에 의해 1991년에 시작하였으며, 세계의 토양의 질(훼손의 종류와 형태, 수준, 훼손의 요인 등)을 1:10,000,000 규모의 공간자료를 생산했다 (Sonneveld and Dent, 2007).

<표 3-58> OECD 주요국의 정책과 제도 및 국가별 증장기 프로젝트 조사·분석 체계

현행		미래
토양오염정화	➤	토양생태관리
사후관리		실질적 사전예방
토양정책 사각지대 다수		사각지대 복원
환경산업기술 중심		환경공공성 기술중심

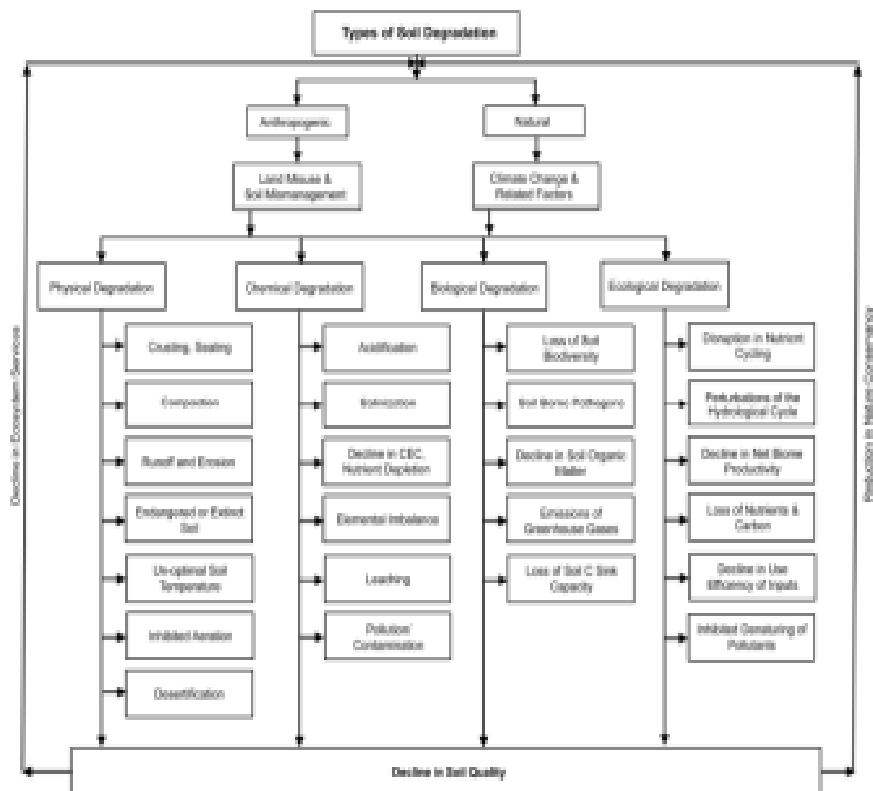
- 미국의 경우, 토양·지하수 보전정책은 크게 토양의 질을 보전하기 위한 환경청(EPA, Environment Protection Agency)의 토양오염예방 및 정화정책 부문과 농무부(USDA, US Department Agriculture)의 토양의 침식, 산성화, 염화, 유기물질 보전 등의 정책으로 부서별로 접근하고 있으나, 토양·지하수를 보전함에 있어 토양·지하수의 기능과 생태계서비스를 보전하고 지속가능한 이용에 초점을 두고 있다.
- 일본은 토양오염예방 및 저감정책이 중앙정부(환경성과 농림부) 차원에서 1990년 이후 이행되고 있으며, 표토의 중요성을 인식하고 1974년에 도시계획법을 개정하고 일정 규모 이상의 개발 행위의 개발 허가기준으로 표토의 보전과 함께 수목의 보전까지 의무화하는 취지의 표토보전을 1975년부터 시행하고 있다.
  - 토양침식이나 홍수 방지, 수질정화 등 환경에 대한 플러스 기능을 가진 생태학적, 환경적 평가가 이루어지고 있으나 토양안보 차원에서 토양의 기능과 생태계서비스의 보전 정책이 정부 차원에서 이루어지고 있지 않다.
- 중국은 토양오염, 토양의 염화, 황무지화, 사막화, 토양침식, 유기질소의 하락 등 다양한 방면에서 토양의 건강성이 훼손되고 있으나 최근까지 토양침식과 토양의 오남용 및 부적절한 개발로 인한 부지의 생산성 하락에 치중해왔다.
  - 최근 수년 중국 정부는 토양오염의 심각성을 인식하고, 2016년 「토양오염방지행동계획」 (“토10조(土十條)”로 약칭)을 수립하여 오염부지의 안전성을 확보하기 위한 차원에서 접

근하고 있으나 토양의 기능과 생태계서비스의 보전 정책이 정부 차원에서 이루어지고 있지 않다.

### ③ 토양안보에 대한 학술 논의 및 국제 동향

○ 기후변화, 토양의 오염, 침식, 차폐, 답압, 산성화·염화 등에 의해 토양의 기능과 생태계 서비스가 훼손되고 있으며, 지하수의 지속가능한 이용이 위협받고 있음이 국제사회 및 학술모임에서 제기되고 있다.

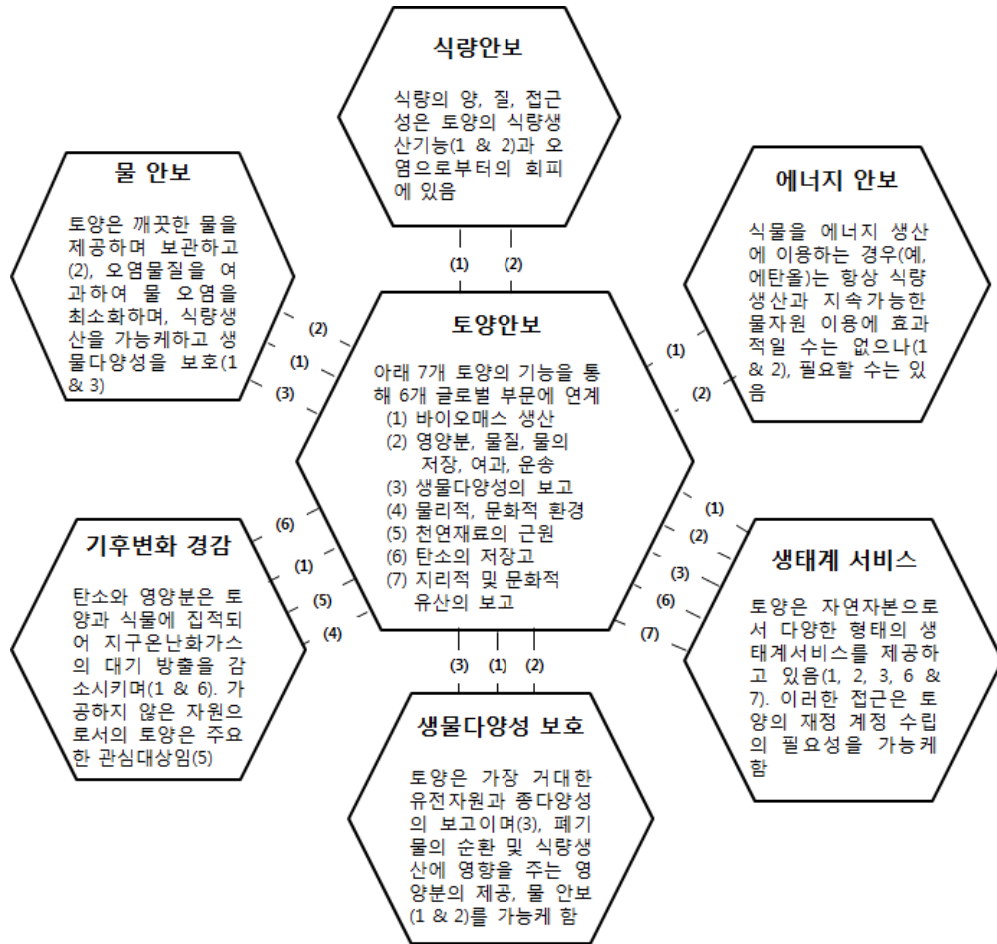
- Lal (2015)는 토양의 훼손을 인위적, 자연적 유형으로 구분하고, 각 유형을 물리, 화학, 생물학적, 생태학적 훼손으로 구분하고, 각 토양질의 훼손 현상을 차폐, 답압, 표층수의 방류, 산성화·염화, CEC 감소, 오염, 토양생물다양성의 손실, 토양유기물질의 감소, 토양병원체의 발생, 기후변화물질의 유출 등 24개 유형으로 구분하였다.



자료: Lal (2015)

<그림 3-78> 토양질의 훼손 유형

- 토양은 인간을 포함한 지구상의 생물이 그 삶을 영위하는 생존의 터전으로 인간은 토양 위에서 인류의 발전을 이루어온 매체로 토양의 생태적 기능과 생태계서비스는 인류의 생존을 위해 보호되어야 한다.
  - 토양의 기능, 생태계서비스는 지구 차원에서 위협받고 있으며, 인류의 지속가능한 개발을 위해 토양은 반드시 보전해야 할 가장 중요한 핵심 매체임을 고려할 때, 토양에 현재와 미래는 인류의 생존을 결정하는 안보에 해당한다 (EU, 2015; Official Journal of the European Union, 2013, Koch et al., 2013; Hurni et al., 2015; Ledbetter, 2015).
    - 유럽연합의 영국, 오스트리아 등과 미국의 토양보전정책은 2000년 이후 토양안보(soil security) 차원에서 접근하고 있다.
- ‘토양안보’는 ‘토양질’, ‘토양의 건강성’, ‘토양의 보호’보다 광범위하고 통합적이며 연계된 다차원(multi-dimensional)의 개념이며, 토양의 다양한 기능 [ i) 바이오매스 생산, ii) 영양물질, 물 등의 저장, 필터링, 이동, iii) 생물다양성 보관, iv) 물리적 및 문화적 환경, v) 천연재료의 근원, vi) 탄소저장고로서의 역할, vii) 지리적 및 문화적 유산의 보고]을 통해 얻을 수 있는 사회·정책에 기반을 두고 있는 것으로 식량안보, 물안보, 에너지안보, 기후변화 저감, 생물다양성 보호, 생태계서비스 특성을 지니고 있다 (McBratney et al., 2014).
  - UN의 지속가능한 개발 목표와 넥서스 접근에서 토양은 인류의 빈곤을 타파, 생태계 관리, 자연자본에 대한 투자와 기후변화 조절 등 다양한 생태계서비스의 제공함으로써 인류 사회에 전반적인 이익을 높여주며, 이를 통해 지속가능한 사회의 능력형성을 제고하며 공공인식을 증진하는 경제적 수단으로 인식되고 있다.
- 토양안보를 지역, 국가, 지구적 차원에서 토양의 위해성에 기반한 틀에서 정량적으로 평가하기 위한 구체적 수단과 방법을 개발해야 하며, 토양안보를 위협하는 여러 요소에 대해 적절한 대응 정책이 이뤄져야한다 (McBratney et al., 2014).
  - 부지(land)는 토양, 암석, 강, 식물로 구성되어 있는 환경매체이며, 토양은 부지(land)의 주요한 형성 요소로써 영양물질의 순환, 물의 저장 및 보유, 생물다양성과 서식처, 물질의 보관, 필터링, 버퍼링, 이동, 물리적으로 안정성과 지원하는 기능을 보유해야한다 (Lal, 2010; Koch et al., 2013; McBratney et al., 2014).



자료: McBratney et al. (2014); Koch et al. (2013)

<그림 3-79> 토양안보와 연계된 토양의 기능과 과학적 개념

- 토양안보는 토양의 다섯 가지 특성인 i) 능력(capability), ii) 조건(condition), iii) 토양의 자본(capital), iv) 사회적 차원의 연결성(connectivity), v) 정책과 규정(codification)의 위협요인을 저감하며, 토양의 보전전략을 경제·사회학, 생물리학으로 확장하고, 정책과 법적 틀을 함께 고려하는 것이다 (McBratney et al., 2014).
- 능력(capability): 농업적 이용과 토지 이용을 포함한 식량과 바이오매스의 생산, 보관, 필터링, 물질이동, 서식처와 유전자 보관, 물리적 및 문화적 인류의 유산, 가공하지 않은 재료의 원천, 탄소의 저장소 등 토양의 기능과 관련된다.
- 조건(condition) : 생물학적 생산성과 환경적인 건강성을 유지함으로써 동식물과 인간의 건강을 지지하는 토양의 기능과 관련된다.
- 토양의 자본(capital) : 토양의 (화폐적인) 가치에 해당된다.
- 사회적 차원의 연결성(connectivity) : 토양에 관련된 사회적 차원의 연결성으로 토양의 기능

을 관리하는 적절한 과학적이고 사회적인 지식을 수반한다.

- 정책과 규정(codification) : 토양의 과학적, 사회적, 자본으로서의 가치를 법제화하는 것이다.

<표 3-59> 토양안보의 위협 요소

특성	토양안보의 위협 요소
능력(Capability)	- 침식, 산사태, 도로 건물 등에 의한 토양차폐, 자연적 재료의 근원
조건(Condition)	- 오염, 유기물질의 감소, 답압과 물리적 토양 훼손, 염화, 홍수 등
가치(Capital)	- 부적절한 토양의 가치 평가와 토양의 가치 평가 과정: 예, 지원(영양물질과 물의 순환, 과정, 생물학적 활성), 훼손(산성화, 염화, 유기물질의 손실, 답압), 조절(홍수 조절, 침식, 토양병원균과 토양미생물에 의한 병 발생, 온실가스 감소) - 재생가능한 자원으로서의 토양의 분별없는 처리
연결성(Connectivity)	- 부적절한 부지관리자의 토양 관련 지식 - 토양의 생태계서비스에 대한 인식 부재와 부적절한 사회적 통념
법(Codification)	- 불완전한 제도 - 부적절한 또는 잘못 제안된 제도

자료: McBratney et al. (2014)

- 넥서스 접근(Nexus Approach)은 “토양·지하수와 다른 매체들과의 상호 관계성과 종속성, 그리고 공간과 요소간의 환경 자원의 이동과 변화를 고려할 때, 상호 연계 및 종속되어 있으므로 다른 환경매체와 통합적으로 연계하여 접근” 해야 한다는 개념으로(Lal, 2015), EU의 제7차 환경이행프로그램은 넥서스 접근 개념을 기본으로 토양·지하수, 그리고 다른 매체들을 연결시키는 전략 및 이행계획의 틀로 볼 수 있다.
- 토양·지하수의 보전과 지속가능한 이용은 UN의 Post-2015 발전목표를 이어 가는 인류의 미래를 이끌어 가는 목표로서 지속가능개발 목적(SDG, Sustainable Development Goals)에 담겨져 있다
  - UN은 SDG에서 각 회원국에 토양의 기능과 생태계서비스를 보전하는 것이 인류의 지속가능한 개발과 더불어 인류의 미래가 달려 있음을 밝히고 있다 (ICSU, ISSC, 2015).
  - UN SDG는 지속가능한 토양의 관리, 토양질의 저감, 황폐화, 토양환경오염으로부터의 위험 감소 및 건강한 생활, 토양에서의 바이오매스의 역할과 에너지 수요, 기후변화를 완화하기 위한 탄소의 포획 이슈와 연결, 지속가능한 토지의 관리 등이 향후 인류가 2030년까지 달성해야 할 목표로 설정하고 있다.
  - UN의 생물다양성협약(Convention on Biodiversity)과 세계식량기구(Food and Agriculture

Organisation)에서도 토양의 생물다양성 보전과 지속가능한 이용을 위한 토양의 생물다양성 주요기능과 이용방법 등에 대한 관련조직의 협력 증진, 토양의 건강성과 농업과 토지의 관리, 훼손된 토양을 복원하기 위해 토양의 생물학적 관리를 주요 정책 수단으로 접근하고 있는 등, 토양·지하수의 기능과 생태계서비스의 보전, 그리고 지속가능한 이용은 지속적인 글로벌 이슈다.

- UN에서 논의되고 UN SDG에 반영된 토양·지하수 보전 목표, 그리고 토양안보에 관한 국제적인 흐름을 볼 때, 우리나라의 토양·지하수 정책을 수립하고 이행함에 있어 다음 몇 가지 사항에 대한 문제점과 고려사항이 도출되어 있으며, 이를 정책의 수립과 이행에 반영할 수 있을 것이다.
  - 첫째, 토양지하수의 정책은 토양지하수 자원에 대한 세계적 인식 변화의 흐름을 고려한 ‘토양안보(soil security)’ 차원에서의 전략적 접근이 필요하다.
    - 기존의 우리나라 정책은 토양에서의 생산성과 기능을 훼손하는 주요 위협요인인 토양오염과 침식으로부터의 토양관리에 초점을 두고 있었으나, 토양의 생물다양성, 유기물질의 순환, 토양유실, 토양의 탄소원, 물질의 저장, 필터링, 버퍼링, 이동, 물리적 안정성과 지지기능을 제공 등과 연계된 토양의 기능과 생태계서비스를 보전하여 건강하고 지속가능한 개발로 연계되어야 한다.
  - 둘째, 지식의 제고이다. 대부분의 선진 OECD 국가들조차도 토양·지하수에 대한 지식과 정보가 미흡하며, 이 부분의 지식과 정보 없이는 토양·지하수를 근본적인 자원으로 보전하기 위한 효과적인 정책과 프로그램을 개발하기 어려움을 인식해야 한다. 우리나라의 경우도 현재 뿐 아니라 미래에도 토양·지하수 부분의 지식과 정보에 대한 수요가 높아짐을 인식해야 하며, 토양·지하수 부분의 지식과 정보를 축적해야 할 것이다.
  - 셋째, 토양의 기능과 생태계서비스의 보전과 지속가능한 이용 정책 목표와 이행계획을 수립하기 위해서는 토양 생물다양성 본질과 역할에 대해 더욱 많은 정보와 이해가 필요하다. 토양 생물다양성의 표준화된 방법과 벤치마킹, 토양환경과 지속가능한 이용 방법에 의해 변화되는 토양생물다양성이 나타내는 영향, 토양의 질, 토양 내외 위의 생물다양성간의 연계 등을 이해하기 위한 지식과 정보가 축적되어야 할 것이다.
  - 넷째, 토양, 물, 공기의 통합적인 관리가 이루어져야 함. 토양, 물, 공기는 상호간에 밀접하게 연결되어 있으며 함께 관리되어야 한다. 예를 들면, 산업활동이 활발히 일어나는 농경지 등에서 배출되는 물에 의한 오염은 저감되어야 하며, 기후변화와 토양(특히 이산화탄소의 근원이며 싱크인 토양 유기탄소의 역할을 포함하는)간의 상호관계에 대한 토양의 산성화와 질소의 축적으로부터 토양을 보호하기 위한 관리는 관련 환경매체 부문이 통합적으로 연계되어 이루어져야 한다.

- 다섯째, 집약적인 토양·지하수의 이용에 의한 영향을 저감해야 한다. 토양·지하수의 집약적 이용은 토양과 지하수에 직·간접적인 피해를 나타내고 있으며, 이를 해결하기 위한 좀더 지속가능한 이용방법이 필요하다. 예를 들면, 토양을 보호하고 지하수 오염을 저감하기 위한 목표 지향적인 수단이 필요하다. 농업 부문에서는, 유해화학물질과 과도한 영양소의 토양·지하수의 축적을 저감·방지하기 위해서는 토양의 이용자들이 토양에 살포하는 농약(화학물질)과 비료의 양을 조절하고, 농약의 잔류성, 토양의 물리적 특성 정보가 필요하다.
  - 여섯째, 토양이 오염된 지역은 해결(정화)되어야 하고, 홍수·사막화·유실 등이 발생하는 지역에서는 토양·지하수의 위해요인을 조절하기 위해 지속가능한 이용 방법이 마련되고 이행되어야 한다. 이 과정에 유해 화학물질에 의한 토양오염을 방지하는 기업체의 노력이 제고되어야 하며, 토양·지하수의 기능을 고려한 홍수·사막화·유실 등을 조절하기 위한 지속가능한 도시와 지역의 토양·지하수가 관리정책이 이행되어야 한다.
- 지하수의 통합적 이용관리를 목표로 수자원의 확보와 함께 자원으로 이용하고 지하수-수계의 통합적 해석과 수환경관리가 이루어져야 한다.
- 지하수의 환경관리 특성상 이용에 따른 오염과 지하수 자원의 훼손으로 2차적 물리적, 생물학적 환경피해가 발생 될 수 있으며, 지반침하나 수자원의 부족은 물론이고, 지하수이용 한계로 지열이나 광천수 등 먹는물 활용까지 피해가 예상된다.
  - 지하수는 단순한 수자원으로 물환경관리가 아니라, 지열, 온천 등 이용에 따른 친환경적 관리가 병행되면서 자원으로 역할이 지속가능할 필요가 있다.
    - 특히, 기후변화대응과 적응문제를 극복하기 위해서 물부족과 다양한 물수요를 동시에 만족시킬 수 있는 보전 문제는 계속되어야 한다.
- 지하수의 공적 이용 개념 확립과 지하수 보호책임을 지고, 통합적인 수계-지하수 환경 해석을 통해 엄격한 지하수 수질관리가 이루어져야한다.
- 지하수법을 개정하여 지하수를 공수화(公水化)하고 엄격한 지하수 수질관리를 실시, 이를 근거로 지하수의 수량과 수질관리를 일원화하여 통합관리 방향을 설정해야 한다.
    - 지하수 상당 부분이 지자체의 지하수보전 조례나 수질보전 조례를 통해 이루어지고, 물정책과 물관련법에서 지표수 보다는 지하수 수질보전의 중요성을 부각, 지하수기본법을 통해 지하수의 국가 소유를 규정하고 지하수 함량, 배분, 질과 양의 동시보전을 위한 법제화해야 한다.
- 기후변화대응과 적응문제를 극복하기 위해서 물부족과 다양한 물수요를 동시에 만족시킬 수 있어야 하며, 지하수 환경 감시체계 구축을 통한 합리적 이용을 유도해야 한다.

- 수질자료를 보관하여 수질 변화 경향을 확인 및 취수정 주위에 감시정을 설치하여 지하수 수질의 조기경보체제를 확보해야 한다.
- 기존 오염지하수의 정화와 오염방지, 지하수의 최적이용과 배분문제에 동시에 주력할 필요가 있다.

#### (나) 기술 및 산업

- OECD 주요 선진국과 국제적으로 다뤄지고 있는 토양·지하수 기술 산업은 향후 우리나라에서 기술, 산업을 발굴하고 국내외 여건에 대응하는 기회일 수 있을 것이다.
- 토양환경의 질을 관리하기 위한 토양유기물, 토양생태계 서비스 등의 환경정책방향은 물, 에너지, 식량, 폐기물, 대기, 토양 등 모든 환경요소, 공간, 이동과 변화를 통찰하여 연계하여 접근하는 전략이다.

<표 3-60> 국내·외 토양환경정책, 기술 및 산업 여건과 SWOT \*

현황 및 전망	주요 시사점	SWOT 관점에서의 시사점			
		기회	위험	강점	약점
국내 토양 환경 정책	- 오염·정화 관리 중심에서 토양의 기능과 생태계서비스에 기초한 공공성 회복 및 정책으로의 전환으로 통합관리체계 구축에 대응하는 정책발굴 (사례: 토양분야: Life program)	√		√	
	- 주요한 위협요인을 기후변화, 부지의 이용용도 변화 및 화학물질 등에 의한 토양오염, 토양 침식·유실, 유기물질의 감소, 토양의 다짐·차폐, 염화·산성화, 생물다양성 감소 등으로 간주	√			√
	- [토양환경관리 산업·기술 육성을 위한 효율적 규제 대응]	√	√	√	
	- 온실가스 배출규제, 에너지 효율 규제, 녹색보호주의 규제, 유해물질에 대한 규제에 대하여 적극 대응. 관련된 필요 기술 및 산업 육성 - [시장창출을 위한 선도적 규제 대응]	√		√	√
	- 신 토양환경관리 산업 초기시장 활성화를 위한 규제정책, 규제 로드맵 제시, 규제 연계 기술·산업 육성정책, 글로벌 규제설정 활동의 적극 참여	√	√	√	
해외 토양 환경 정책	- [UN SDG] 토양보전이 지속가능개발의 핵심 : 식량생산, 기후변화, 에너지, 건강한 생활, 생태계보호	√			√
	- [CBD] 토양의생물다양성 보전 - 기능과 생태계 서비스의 보전	√			√
	- [Nexus접근] 물, 에너지, 식량, 폐기물, 대기, 토양 등 모든 환경요소, 공간, 이동과 변화를 통찰하여 연계하여 접근 - 토양안보는 넥서스 접근의 핵심	√			
토양 환경 기술	- 기술수준 제고 : 선진국과의 기술 수준격차 축소 필요	√			√
	- 전략적 선택과 집중 필요	√			
	- 신 토양환경관리 분야의 원천기술 확보 주력	√			
	- 기술의 실용화·상용화 강화 필요	√			√
토양 환경 산업	- 토양환경관리 산업의 성장·발전 기회와 국내 토양환경관리 산업의 경쟁력을 고려한 전략적 산업 육성 필요	√			√
	- 국내 토양환경 관련 중소기업의 전반적인 영세성 극복	√			√
	- 내수시장의 기반 확충을 통한 자생력 확보 필요	√		√	
	- 세계시장에 대한 지속적인 모니터링 필요	√			

주: \*SWOT : Strength(강점), Weakness(약점), Opportunity(기회), Threat(위협)

- 지하수는 전세계적으로 추진하고 있는 지속가능한 발전의 개념에 잘 들어맞는 유형의 환경 매체이자 자원으로써 지하수 생태적인 이용가치를 향상시키고 물순환의 회복에서 중요한

역할을 하는 영역이라 할 수 있다.

<표 3-61> 국내외 지하수환경정책, 기술 및 산업 여건과 SWOT

현황 및 전망	주요 시사점	SWOT 관점에서의 시사점			
		기회	위험	강점	약점
국내 지하수 환경정책	- 기후변화적응을 위한 지하수 이용정책 강화 - 먹는물 고품질화 - 지하수 수생태계 보전 관리 정책 추진		√		
		√			
해외 지하수 환경정책	- 지하수수질-수량의 통합적 환경정책 - 지하수 이용가치 향상 정책 추진		√		
			√	√	
지하수 환경기술	- 지하수의 친환경적 이용관점 - 지하수 수생태 보전기술		√		√
지하수 환경산업	- 지하수보전 인프라의 지속적 구축 요구 - 해외진출 물산업의 틀 추진 필요	√		√	
				√	

주: \*SWOT : Strength(강점), Weakness(약점), Opportunity(기회), Threat(위협)

- 토양·지하수환경분야 정화기술의 투자대비 실증기술의 확보는 이루어졌으나, 사전예방 및 오염조사 등의 요소기술의 실용화에는 한계점을 가지고 있으며, 신규오염물질, 오염원 관리 강화 등의 환경현안정책에 대응하는 중점기술개발 추진이 요구된다.
  - 기존에 토양·지하수오염방지기술개발사업(2008-2017)을 통해 국내 토양·지하수 환경시장의 90%이상을 국내기술로 대체하기 위해 추진 중이다.
  - 토양·지하수환경기술은 화학물질 누출에 따른 오염물질 확산 및 제어거동, 처리 등의 환경유해물질의 관점에서만 관리되고 있다.
- 생태적 환경관리의 사전예방기술과 위해성평가기술의 확보, 정화기술의 고도화, 융합기술의 확대 개발이 필요하다.
  - 토양·지하수환경기술개발의 적용 및 활용대상 영역이 다변화 진행 중이며, 지중환경관리 체계로 확대될 전망이다.
    - 우리나라의 토양·지하수환경기술은 기술수준은 분야별로 차이가 있으나 선진대비 2014년 74% 수준에 근접한 것으로 평가되었다.
    - 현재 선진국에서 집중 추진 중인 고효율저에너지 기반의 녹색정화기술 개발은 이제 개념 정립단계이다.

<표 3-62> 주요 기술·산업 미래 트렌드 정리

1. 기술개발 대상이 사전예방적 토양·지하수의 친환경 이용관리체계로 확대
2. 환경에 대한 영향을 최소화하는 환경친화적인 기술에 대한 연구 활발
3. 타분야와의 융합은 더욱 활발하게 이뤄지는 가운데 환경편익을 향상시킬 수 있는 활용에 대한 관심 증대

○ 국내 토양·지하수 산업체들의 경영위기 및 산업붕괴위기 등의 우려가 대두되고 있다.

- 국내 시장은 최근 5년간(2009-2013) 연간 4천7백억 내외로 성장이 정체 중이다.
- 국내 토양·지하수 관련 산업체는 토양정화업 등록제도(2005), 누출검사 의무화(2006)로 급격하게 성장하였으나, 2011년을 정점으로 토양정화 업체수 감소 추세(2011년, 124개 ⇒ 2014년, 93개)를 보인다.
- 토양·지하수환경산업의 특성상 오염관리는 오염유발 시설과 이력을 가진 오염사고가 주종을 이루고 있으나, 산업적 측면의 매출향상을 국내에서 한계를 가지고 있어서 기존 기술 역량을 활용한 중국과 같은 해외진출 이나 국내의 토양·지하수환경의 가치를 향상시키는 새로운 영역으로 확대발굴이 요구된다.

○ 토양·지하수는 대기, 물과 함께 환경산업의 주요 매체를 이루므로 환경산업의 매체별 하위산업으로 토양·지하수매체의 기능 확대에 따른 수요발굴로 산업육성이 요구된다.

- 환경산업의 주요 기능 사이클은 예방·제어, 조사 및 평가, 정화·복원, 검증, 재활용의 순환 사이클을 형성하며 이는 토양·지하수에도 동일하게 적용된다.
- 환경산업은 위의 순환 기능을 이루는 기능 서비스 활동 외에 이러한 활동에 소요되는 장비 및 용품의 제조 활동과 이에 관련된 정보나 지식 서비스 활동도 포함되며 이는 토양·지하수산업에도 동일하게 적용하는 것이 합리적이다.

<표 3-63> 새로운 토양·지하수산업의 개념

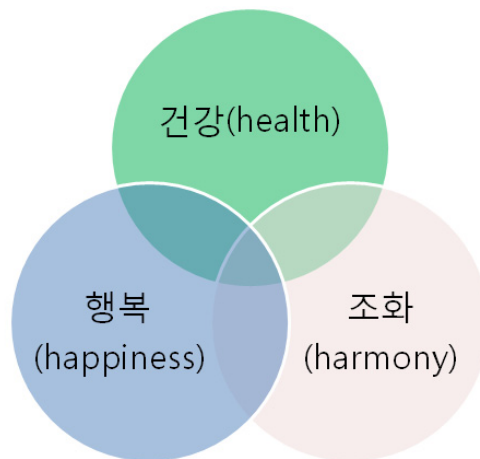
토양지하수환경산업은 환경매체의 원기능 회복과 생태서비스 향상을 위한 ‘토양·지하수’를 대상으로 환경질을 관리하는 사전예방, 조사·평가, 정화·복원, 검증, 관리·재활용에 관련된 기능을 수행하는 수입창출활동으로서, 이러한 기능 사이클을 수행하는 데 소요되는 기계, 장비 및 원재료 등을 생산하는 ‘제조 활동’ 과 관련된 장비나 원재료 등을 사용하여 ‘기능을 수행하는 활동(서비스)’, 제조활동과 기능수행 활동에 ‘지식과 정보를 제공·지원하는 활동(서비스)’

## 라. 토양·지하수·환경보전정책의 신 패러다임 및 주요 정책

### (1) 토양·지하수·환경보전정책의 新 패러다임

#### (가) 토양·지하수·환경 정책 비전

- 토양·지하수·환경 보전정책의 비전은 과학과 정책을 연결시키는 개념의 틀로써, 우리나라의 국내외 여건, 기후변화와 토지이용변화, 세대간과 세대내 균형을 고려하는 환경정의 실현 등의 정책변화요인, UN에서의 토양·지하수·환경보전 등의 국제동향 등을 고려할 때, 토양·지하수·환경 비전을 건강하고, 행복하고, 조화로움(3H, Health, Happiness, Harmony)으로 할 수 있다.
- 토양과 지하수는 인류와 생태계에 필수적이고 민감하게 상호작용하는 공적자원으로 자연 환경과 더불어 건강하고 안전하게 모두가 누릴 수 있어야 하며, 현재와 미래를 위한 지속적인 기능과 가치를 확보해야 한다.
- 토양·지하수·환경 정책 비전은 토양·지하수의 건강한 환경과 경제, 사회 부문의 조화, 국민의 행복, 환경·타매체 및 세대간의 융합, 화합, 어울림을 고려한 것이다.



<그림 3-80> 토양·지하수·환경보전 정책의 비전

#### (나) 토양·지하수·환경 정책 목적과 목표

- 우리나라에 합리적으로 적정한 토양·지하수·환경보전의 목적은 우리나라의 토양·지하수 정책의 문제점과 이슈, OECD 주요 선진외국에서의 토양·지하수 정책의 목적과 목표, 최근 UN 등에서 논의되고 설정된 지속가능한 개발목적(Sustainable Development Goals,

SDG)에 따라 토양지하수환경을 보전하고 지속가능하게 이용할 수 있도록 정책 개념 및 수단인 ‘넥서스 접근(Nexus Approach)’을 종합적으로 고려하는 것이다.

- 토양과 직, 간접적으로 연계된 8개의 SDG(SDG 1, 빈곤 감소; SDG 2, 기아종식; SDG 3, 건강한 생활과 복지; SDG 7, 적정하고 깨끗한 에너지; SDG 11(지속가능한 도시와 공동체); SDG 12, 책임있는 소비와 생산; SDG 13, 기후변화와 대응; SDG 15, 육상생태계; SDG 16, 평화적이고 정의로운 강력한 제도), 토양의 생태적 한계를 고려하여 토양을 보전하고 지속 가능하게 이용할 수 있도록 오염 부지를 복원하며, 토양의 침식 저감, 표토의 다짐과 차폐를 저감하기 위한 정책이 필요하다.
- 지하수에 대해서는 깨끗한 물과 위생을 지속가능발전 목적으로 하는 SDG6를 포함한 총 9개의 SDG(SDG 2 기아종식; SDG 5 성 평등; SDG 6 깨끗한 물과 위생; SDG 7 적정하고 깨끗한 에너지; SDG 11 지속가능한 도시와 공동체; SDG 13 기후변화와 대응; SDG 14 수생태계; SDG 15 육상생태계; SDG 17 지구촌 협력), 생태계의 지속가능한 서비스를 보장하고, 깨끗한 지하수를 안전하게 이용할 있도록 수질을 보전관리하며 물 부족 해소, 물 안보를 확보하기 위한 정책이 요구된다.
- 특히 현재 그리고 향후 그 비중이 점점 높아지는 토양·지하수환경의 다른 요소(기후변화, 식량, 에너지, 폐기물, 물, 생물다양성, 복원력 등)와 통합적으로 연계하여 접근하는 정책 개념인 넥서스 접근 개념을 고려한 협치(Good Governance)는 토양·지하수를 관리하는 주요 목적이며 수단으로 설정하고자 하였다.

## ■ 목적

- 토양·지하수를 훼손하는 요인으로부터의 건강하고 안심한 토양·지하수질을 회복하고 유지하기 위함이며, 상세 목적은 다음과 같다.
  - 토양·지하수의 기능과 생태계서비스의 회복력 제고
  - 건강하고 생산적인 토양·지하수환경 유지
  - 기후변화에 대응 (기후변화요인물질의 감축과 적응)
  - 협치(Good Governance): 식량, 에너지, 폐기물, 물 등 환경 매체 또는 요소들과 연계한 지속 가능한 토양·지하수의 관리

## ■ 목표

- 우리나라에서 토양·지하수환경에 위해 또는 위협하는 토양·지하수환경 요소를 관련 정

책부문과 연계하여 토양보전정책의 목표를 수립할 수 있다.

- 우리나라에 합리적으로 적정한 토양·지하수환경 보전의 목표는 우리나라의 토양·지하수를 위해하는 주요 요인에 대한 대응 및 앞서 설정한 토양·지하수환경보전의 목적을 달성하기 위하여 설정한 것이다.
- 정량화된 토양·지하수 환경보전의 목표를 두고 이를 이행하기 위한 계획 또는 프로그램을 세우고 목표 이행에 대한 성과를 확인하는 것이 목표를 이룰 수 있는 최선의 방법일 수 있으나, 현재 주어진 정보와 자료로써는 이들 목표에 대한 정량적인 수치를 가늠하기 어렵기 때문에 이들에 대한 계량적인 목표를 제시하지 못한 것이다.
- 차후에 가능하다면, 토양·지하수 환경보전의 목표의 이행 요소 또는 이들 요소를 가늠할 수 있는 계량적 지표(index)를 두는 것이 바람직할 것이다.

#### 토양·지하수환경보전정책의 목표

- 토양지하수오염(contamination)예방·방지·저감·처리
- 토양침식(erosion) 방지·저감
- 토양다짐(compaction)과 토양차폐(sealing) 저감
- 토양의 염화·산성화 방지·저감
- 적정한 토양 유기물질의 보전과 이용
- 토양 생물다양성의 보전
- 법과 제도의 구축



자료: Lal (2015)

<그림 3-81> 토양·지하수의 건강성을 훼손하는 P(Process)-F(Factor)-C(Cause) 연관관계

#### (다) 토양·지하수환경 정책방향

##### ■ 현황 및 추세

- 토양생태계 훼손은 증가할 것이다.
  - 토양의 건강성을 결정하는 토양생태계 훼손은 더욱 가속화 될 것이며, 토양의 생태계서비스

는 빈곤층, 사회적 약자들에게 불평등하게 더욱 큰 영향을 미치게 될 것이다.

- 경제·사회적 여건, 기후변화 등으로 인해 구제역 확산에 따른 가축매몰지 주변 토양 및 지하수의 오염, 산불증가에 따른 산림훼손, 토양 황폐화 및 유실, 홍수 등에 의한 토양 유실 등이 증가할 것이다.
- 개발지역은 도시와 도시 인근 지역으로 확대, 농촌지역의 인구는 감소할 것이다.
  - 토지이용과 토양의 건강성 관계가 사회적인 문제로 확산될 것이다.
- 지속가능한 경제·사회의 발전이 있을 것이다.
- 사람들의 직업, 취미, 성향 등이 점점 다양화된 사회로 발전할 것이다.
- 에너지 소비는 증가할 것이다.
  - 지구의 모든 국가에서 미국 수준의 에너지를 사용할 경우, 현재보다 270% 에너지 사용량 증가하게 될 것이다.
- 생태계 보전에 대한 국내 및 국제사회의 경쟁은 더욱 치열해 질 것이며, 압력은 증가될 것이다.
  - 육류와 바이오에너지 수요 증가에 의해 토양생태계 보전에 관한 지구적 차원과 국내 압력은 점차 가중될 것임. 특히 기후변화에 연계되는 지구의 생태계 보전에 대한 압력은 더욱 증가될 것이다.
  - 국제적 압력 증가할 것임: US SDG, 생물다양성협약, 나고야의정서(ABS), IPBES, 사막화협약 등에서 회원국에 대한 토양생태계보전에 대한 압력이 높아질 것이다.
- 경제·사회적 여건, 기후변화 등으로 인해 구제역 확산에 따른 가축매몰지 주변 토양 및 지하수의 오염, 산불증가에 따른 산림훼손, 토양 황폐화 및 유실, 홍수 등에 의한 토양 유실 등이 증가할 것이다.

## ■ 정책방향 도출을 위한 SWOT 분석

- 토양·지하수 환경정책의 추진 방향을 관련 요소들의 SWOT 분석 결과를 활용하여 제시하면 다음과 같다.
  - 과학적인 토양·지하수환경 정책 효율성 확대
  - 시장창출형 토양·지하수환경 정책의 추진
  - 토양 안보 및 물 안보 문제 중장기적 대응

- 토양·지하수환경의 건강성 보전·개선을 위한 관련 기술·산업 육성
- 토양·지하수환경 관리 강점 기술분야 활용 국제협력 강화
- 토양·지하수환경 관리 분야에 대한 선진국과의 기술협력 강화
- 시장창출을 통한 R&D 투자
- 관련기업의 토양·지하수환경 관련 산업 대응 활동 지원강화
- 토양·지하수환경 관련 국제 공조 정책 개발 협력강화

강점 (S)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양·지하수환경 관리체계 구축에 대응하는 정책 발굴</li> <li>- 토양·지하수연구단 등을 통한 토양·지하수환경관리 기반기술 확보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양·지하수의 질 보전·개선을 위한 관련 기술·산업 육성</li> <li>- 강점 기술분야 활용 국제협력 강화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양·지하수환경관리 정책 확대</li> <li>- 시장창출형 토양·지하수환경 정책의 추진</li> <li>- 토양 안보와 물안보에 대한 문제 중장기적 대응</li> </ul>
			<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>SO</span> <span>ST</span> </div>
약점 (W)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 신 토양·지하수환경관리 분야 정책기술 확보 미흡</li> <li>- 토양·지하수환경관리 정책의 법제도 실제 반영 취약</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양·지하수환경관리분야에 대한 선진국과의 기술협력 강화</li> <li>- 시장창출을 통한 R&amp;D 투자</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 관련기업의 토양·지하수환경 관련 산업 대응 활동 지원강화</li> <li>- 토양·지하수환경 관련 국제 공조 정책 개발 협력강화</li> </ul>
			<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>WO</span> <span>WT</span> </div>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양·지하수의 건강성 보전 및 인체 영향에 대한 관심 증대</li> <li>- 새로운 시장의 토양·지하수환경관리 산업의 성장 가능성 증대</li> <li>- 국제협력 가능성 증대</li> </ul>
		기회(O)	위협(T)

<그림 3-82> 토양·지하수환경 정책 요소들의 SWOT 분석

### ■ 정책방향

- 토양·지하수환경 정책은 토양·지하수 환경 관리의 영역확대를 위한 정책개발, 새로운 분야 기술, 정책 기반마련, 토양·지하수 관리정책 집행 실효성 확보 차원에서 정책방향 설정할 수 있다.
- 토양·지하수환경 관리의 영역확대를 위한 정책개발이 필요하다.
  - 토양·지하수에 미치는 압력, 특히 다른 매체와의 인과 관계에 의해 도출되는 압력을 줄이는 방향에서 접근 (Nexus approach)이 필요하다.
  - 토양·지하수에서의 생물의 서식처 훼손 및 과도한 개발 등에 의해 토양·지하수생태계의

훼손을 줄이는 데에는 성공하지 못하였으며, 최근에는 합성위해 화학물질과 기후변화 등으로 인해 건강한 인간의 삶을 보장하지 못하고 있기 때문에, 국가차원에서 정책적인 대응이 필요하다.

- 그동안 우리나라에서 토양·지하수환경보전 정책을 토양·지하수오염부지의 조사 및 정화로 접근한 것은 후진국 형태의 토양·지하수환경보전 정책이다. 토양·지하수오염은 적, 간접적으로 발생하는 오염원을 최종 수용하는 매체이며, 수질, 대기 관련된 법에서 오염을 제한함으로써 토양·지하수오염을 상대적으로 감소할 수 있다. 아울러 환경오염에 대한 국민의식이 향상됨에 따라 토양이 오염될 때를 기다리는 것은 시대착오적 정책이며 토양·지하수 환경정책은 새로운 선진국형 패러다임으로 전환해야 한다.

구분	전략방향	추진전략
S-O 전략	- 토양의 질 보전·개선을 위한 관련 기술·산업 육성 - 강점 기술분야 활용 국제협력 강화	<b>토양·지하수 안보</b> - 저감 (mitigation): 토양·지하수 자원의 효율성 제고를 통해 사회경제적 기회를 높임으로써 생태계와 인간의 건강에 미치는 영향을 저감 - 적응(adaptation): 기후와 토양·지하수환경(특히 훼손 요인)의 변화를 예측하고 변화에 대한 경제, 환경, 사회적인 복원력을 높임으로써 적응력을 제고 - 회피(avoidance): 사전고려 및 과학 기반 초기 경보 시스템을 통한 방지 이행으로 인간의 건강과 복지, 토양·지하수 생태계에 미칠 수 있는 잠재적인 환경 위해를 피하게 함 - 회복(restoration): 토양·지하수생태계와 자원과 지속가능한 경제 발전 및 사회적 불평등 해소에 기여하는 사회적 복원력을 회복
S-T 전략	- 토양환경관리 정책 확대 - 시장창출형 토양환경정책의 추진 - Soil Security(토양 안보) 문제 중장기적 대응	
W-O 전략	- 토양환경관리분야에 대한 선진국과의 기술협력 강화 - 시장창출을 통한 R&D 투자	
W-T 전략	- 관련기업의 토양환경관련 산업 대응 활동 지원강화 - 토양환경 관련 국제 공조정책 개발 협력강화	

<그림 3-83> 토양·지하수환경 SWOT 요소들간의 전략 방향 및 전략

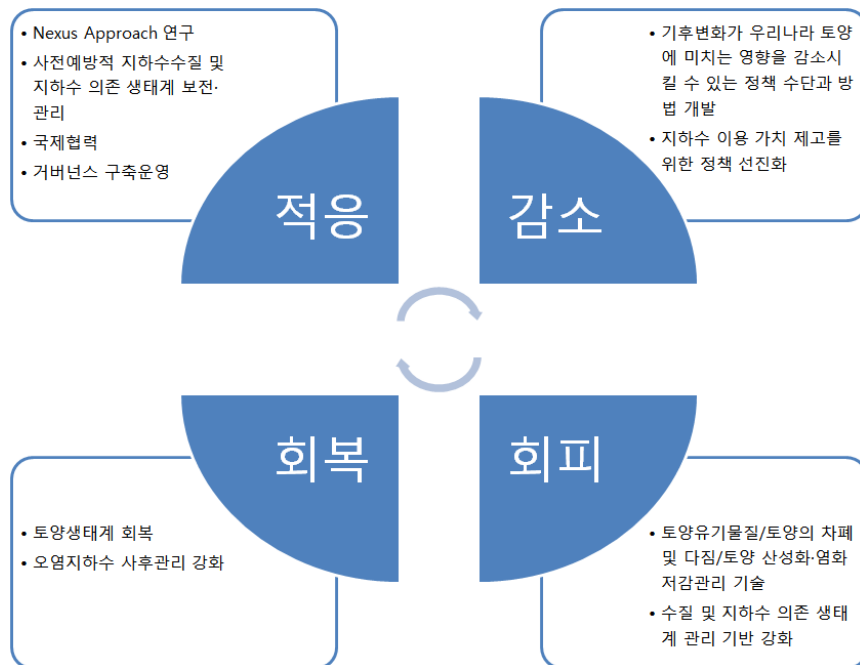
- 새로운 분야의 기술, 산업정책 기반을 마련할 필요가 있다.
  - 토양·지하수환경관련 기술에 대한 정의 및 범위, 분류체계를 도출하여 토양환경기술개발이 이루어져야 한다.
  - 토양·지하수 고유의 질·기능을 보전하고, 토양·지하수 자원을 활용할 수 있도록 다양한 위협인자에 대응하는 토양·지하수환경기술개발의 방향성 분석 및 정립이 필요하다.
  - 토양·지하수 오염조사 및 정화 중심 산업에서 국내 토양·지하수 관련 전문사업자로 산업 확대 및 인프라가 요구된다.

- 토양·지하수 시장의 글로벌 성장세에 따른 국내기업의 해외 진출 가속화 및 효율적 진출 등 국내 토양·지하수 분야 시장 활성화를 위한 지원 필요성을 확대해야 한다.
- 생태기능서비스 및 통합관리, 실질적인 사전예방, 수평적·수직적 지중환경영역 등 현행 토양·지하수환경관리 산업의 전망상 세부사업내용 발굴이 필요하다.
- 토양·지하수질 관리정책 집행 실효성 확보 차원에서 다음의 사항을 마련할 필요가 있다.
  - 토양·지하수환경 정책이행을 효율적으로 할 수 있는 체계를 마련해야 하며,
  - 토양·지하수환경 정책에 투자할 재원을 장기적이고 다양화 할 수 있도록 해야 한다.
    - 토양·지하수환경 건강성의 훼손에 대한 책임 주체 등을 분명히 해야 한다.
  - 토양·지하수 건강성의 훼손에 국가의 책임 및 정부의 재원 마련 방안을 제고하고,
  - 토양·지하수환경 정책 이행과 현재 상태와의 전환 단계에서 나타날 수 있는 한계를 빠르게 극복할 수 있어야 한다.
  - 경제시장을 왜곡하고 환경적으로 위해한 부산물이 투자에 미치는 영향을 없앴으로써 투자금이 공공 재원으로 사용될 수 있도록 해야 하며,
  - 경제적, 기술적이며 사회적 혁신은 녹색경제로 전환을 지원해야 한다.
  - 지식 기반을 확대해야 한다.
    - 특히, 4차 산업혁명시대의 핵심요소인 넥서스 접근, Big Data, IoT, ICT, AT, 3D printing 등의 적용을 통한 새로운 토양환경보전 기술 및 산업 개발을 이룰 수 있도록 접근하는 것이 필요하다.

(라) 토양·지하수환경 정책 접근 전략

○ 토양·지하수 환경의 보전 및 지속가능한 이용은 국가안보 차원에서 i) 인간과 생태계 위해 요인의 저감, ii) 기후와 토양·지하수 환경 변화에 대한 적응력 제고, iii) 인간의 건강과 복지, 토양생태계에 미칠 수 있는 잠재적인 환경 위해에 대한 회피, iv) 토양생태계와 자원과 지속가능한 경제 발전 및 사회적 불평등 해소에 기여하는 사회적 복원력을 회복하는 것으로, 크게 저감, 적응, 회피, 회복 전략이 필요하다 (그림 3-84 참조).

- 저감 (mitigation): 토양·지하수환경 자원의 효율성 제고를 통해 사회경제적 기회를 높임으로써 생태계와 인간의 건강에 미치는 영향을 저감하는 것이며,
- 적응(adaptation): 기후와 토양·지하수환경(특히 훼손 요인)의 변화를 예측하고 변화에 대한 경제, 환경, 사회적인 복원력을 높임으로써 적응력을 제고하고,
- 회피(avoidance): 사전고려 및 과학 기반 초기경보 시스템을 통한 방지 이행으로 인간의 건강과 복지, 토양·지하수 생태계에 미칠 수 있는 잠재적인 환경 위해를 회피하며,
- 회복(restoration): 토양·지하수생태계와 자원과 지속가능한 경제 발전 및 사회적 불평등 해소에 기여하는 사회적 복원력을 회복하는 것이다.



<그림 3-84> 토양·지하수 환경의 보전 및 지속가능한 이용 전략

(마) 토양·지하수환경 정책 추진과제

■ 토양지하수환경정책의 기능 훼손에 따른 회피, 적응, 감소, 회복전략을 설정하여 정책추진을 위한 신규정책과제를 제시

- 토양·지하수환경 보전정책의 고려사항은 아래 여덟 가지에 대한 질문으로부터 실마리를 찾아갈 수 있으며(Prager, 2008), 토양·지하수환경 보전정책의 고려사항은 다음 8가지 사항이다.
  - i) 문제가 무엇인가? ii) 무엇이 문제가 될 것인가? iii) 문제가 어디(위치)에 존재하는가? iv) 문제를 일으키는 요인(pressure)이 무엇인가? v) 문제가 나타나는 영향은 무엇인가? vi) 문제는 점점 나빠질 것인가? 그러하다면 어느 정도까지 나빠질 것인가? vii) 문제를 어떻게 막을 수 있는가? viii) 문제를 막는데 어느 정도의 비용이 소요될 것인가? ix) 문제의 해결비용을 누가 지불할 것인가?
- 우리나라의 토양정책의 경우에는 최근까지 아래 i)~iv)단계에서 토양오염 외의 토양침식, 토양유실, 토양의 생물다양성, 토양의 차폐와 답압 등의 토양의 기능을 훼손하는 문제에 대해서는 토양환경보전 정책에 거의 고려하지 않았다.
  - 본 연구에서는 토양의 원기능이 훼손되는 요인에 대해서, 토양의 생태적 회복을 위한 대응과 적응, 저감전략을 포함하여 생태적인 관점의 토양질 향상에 궁극적인 목표를 제시한다.
  - 이에 따라 (1)저감전략에 대해서 기후변화가 토양에 미치는 영향을 감소시킬 수 있는 정책 수단과 방법 개발, (2) 회복전략에 대해서 토양생태계 회복정책, (3) 회피전략에 대해서 토양유기물질, 토양의 차폐 및 다짐, 토양 산성화·염화의 대응정책을 제시하고, (4) 적응전략에 대해서 국제협력과 관련 이해당사자들과의 거버넌스 구축운영을 제시하였다.
- 지금까지 우리나라의 지하수정책의 경우에는 지중매립시설 등의 지중환경영향요소 관리, 물안보 확보 관점에서의 지표수-지하수 연계이용, 지하수 의존 생태계 관리 등의 문제에 대해서는 거의 고려하지 않았다.
  - 지하수의 원기능은 물순환과 지중환경의 원상태의 회복에 초점을 맞추어 지속가능한 지하수의 친환경이용 및 환경보전을 궁극적인 목표로 제시하였다.
  - 이에 따라 (1) 적응전략에 대해서 사전예방적 지하수수질 및 지하수 의존 생태계 보전·관리, (2) 저감전략에 대해서 지하수 이용 가치 제고를 위한 정책 선진화, (3) 회복전략에 대해서 - 오염지하수 사후관리 강화, (4) 회피전략에 대해서 수질 관련 산업육성 및 기술개발 촉진, 수질 (및 지하수 의존 생태계) 관리 기반 강화를 제시하였다.

■ **Nexus Approach 연구 : 토양·지하수환경에 영향을 미치는 다양한 요소들 간의 연계성 확인 및 통합적으로 접근할 정책 개발**

- 토양·지하수환경 건강성 보전 및 훼손에 대한 토양-대기-물(지표수, 지하수)-식량-폐기물-에너지-토지이용-기후변화의 Nexus Approach 방안 등 정책 개발이 필요하다.
  - 우리나라에서 토양·지하수환경의 건강성에 대한 영향 요인, 압력 조사 및 평가가 필요하다.
- Nexus Approach에 기반한 토양·지하수환경 건강성 훼손의 책임 주체 및 정부의 재원 마련 방안 개발이 필요하다.
- 토지이용 정책(Land Use Policy)으로 인한 토양·지하수환경의 건강성 훼손 현황 조사 및 평가, 정책 방안 마련이 필요하다.
  - 정책 및 경제 변화에 따른 토지이용 정책이 토양·지하수환경의 건강성에 미치는 영향과 토지 이용 정책 방안과 연계되어야 한다.

■ **기후변화가 우리나라 토양·지하수환경에 미치는 영향을 감소시킬 수 있는 정책 수단과 방법 개발**

- 기후변화와 적정 토지 이용(도시화 및 농촌화) 방안
- 기후변화와 토양·지하수환경생태계 변화 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화에 따른 토양·지하수환경생태계 보전 및 지속가능한 이용방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 토양의 생물다양성 보전 및 지속가능한 이용방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 토양환경의 유기물질(유기 탄소와 질소) 보전 및 함양방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
  - 우리나라에서 기후변화(온도, 강우의 양과 빈도 등)에 따른 토양의 유기물질(유기 탄소와 질소)의 함량 변화 평가
- 기후변화와 토양수분 함량 변화 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 토양수분 함량 변화, 산사태 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 지하수 부존량 변화 예측 및 적응방안 (전국 및 지역단위에서 접근)
- 기후변화와 지하수 함양방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)

- 기후변화와 토양의 산성화·염화 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 토양의 침식(유실) 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 토양의 다짐과 차폐 변화 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 토양수분 함량 변화를 고려한 토양침식(유실), 산사태 예측 및 감소 방안
- 기후변화와 우리 토양의 사막화 민감도 분석, 예측 및 적응 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화와 기저유출 유량 변화 및 지하수의존생태계 변화 예측 및 적응방안(전국 및 지역 단위에서 접근)
- 가뭄 등 기후변화 대비 지하수 활용보급 확대 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화 대비 물공급 취약지역 지하수 보급 방안 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 기후변화가 우리나라 토양·지하수환경에 미치는 영향평가 및 적응방안
- 기후변화에 따른 토양·지하수생태계서비스의 평가
- 기후변화와 토양·지하수생태계 변화에 대한 공공 인식의 제고

#### ■ 토양·지하수생태계 회복정책

- 토양·지하수생태계의 기능 평가 방법 개발(법, 제도)
- 토양·지하수생태계의 건강성 평가 방법 개발
- 토양·지하수생태계의 서비스 평가 방법 개발 및 산정
- 토양·지하수생태계의 보전 및 지속가능한 이용 정책 이용 수단 개발 (법, 제도)
- 토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 체계 개발 (법, 제도)
- 토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 정책 개발 (법, 제도)
- 토양·지하수의존 생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 정책 개발 (법, 제도)
- 토양의 사막화 평가 및 적응 정책 개발 (법, 제도)
- 토양훼손 요인(토양오염, 차폐, 다짐, 산성화·염화방지, 유기물질 감소, 사막화 등)이 토양생태계에 미치는 영향 평가 방법 개발

- 지하수환경 훼손 요인(지하수오염, 도시화, 산업화, 지하공간 개발이용, 건전화, 하천사업 등)이 지하수의존 생태계에 미치는 영향 평가 방법 개발
- 토지이용변화(정주지역 개발, 도로, 기반시설, 농지개발 등)가 토양·지하수의존 생태계에 미치는 영향 평가
- 지중환경영향요소 현황 조사 및 평가, 관리정책 개발 (법, 제도)
- 지중환경민감성에서 기반한 지하수수질관리정책 개발 (법, 제도)

### ■ 지표수-지하수 연계 관리 정책

- 유역단위의 지하수수질 현황 조사
- 기후변화, 지진 등의 재난재해 대비 지하수 비상급수시설 현황 조사
- 물 안보 확보를 위한 물 배분체계 구축
- 하천, 호소 등의 기저유출 유량 및 수질 현황 조사
- 지하수의존생태계 건강성 평가 및 적용정책 개발 (법, 제도)
- 지하수 의존형 생태계 평가 및 적용정책 개발 (법, 제도)
- 지하수 의존형 생태계 현황 조사 및 평가

### ■ 토양유기물질 대응 정책

- 국내 토양에서의 토양유기물질 현황 조사 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 토양의 유기물질의 보전 및 지속가능한 이용 대책 개발 (법, 제도)
- 토양의 생태계와 생물다양성 훼손 방지, 다짐 및 차폐, 산성화·염화 저감을 위한 환경성 평가 및 환경영향평가 적용 방안 (법, 제도)

### ■ 토양의 차폐 및 다짐 대응 정책

- 토양의 차폐 및 다짐 현황 조사 및 평가 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 토양다짐의 평가 및 적용 정책 개발 (법, 제도)

- 토양차폐 평가 및 적용 정책 개발 (법, 제도)
  - 특히 도시지역에서의 토양 차폐 기준 및 적용 방안
- 토양의 차폐·다짐, 토양의 물함량과 산사태 연관 관계 조사 및 평가 (전국 및 지역 단위에서 접근)

### ■ 토양 산성화·염화 대응 정책

- 우리나라에서 토양 산성화·염화 조사 및 평가 (전국 및 지역 단위에서 접근)
- 토양 산성화·염화 방지를 위한 지속가능한 정책 개발 (법, 제도)

### ■ 국제협력

- UN SDG/CBD 등의 국제협약에 대한 대응 전략 개발 (토양·지하수생태계, 생태계서비스, 다짐, 차폐, 사막화, 산성화, 염화, 토양오염, 토양유기물질, 기후변화)

### ■ 지중환경 위해저감·관리 정책

- 지중환경의 이용 확대에 따른 지중환경민감성 평가 및 지중환경 관리
- 도시지역 오염원 및 위해요소 발굴 및 관리방안 마련
- 지중환경(지하수-토양-폐기물 등) 통합정화사업 추진 체계 마련 및 오염부지 자원통합정화

### ■ 거버넌스 구축

- 토양·지하수의 기능과 생태계서비스를 보전하고 지속가능하게 이용하기 위한 정부의 책임과 역할, 거버넌스 체계 구축 방안
- 토양·지하수생태계와 생물다양성, 사막화 민감지역, 산성화·염화방지, 차폐와 다짐, 산사태 민감지역 등에 대한 자료의 정보화 사업 (DB 구축, CH 마련 등)
- 토양·지하수의존 생태계 보전과 지속가능한 이용에 관한 민간협력 방안
- 토양·지하수의존 생태계 보전과 지속가능한 이용에 관한 공공 및 민간 홍보 방안

- 물안보 확보를 위한 지하수의 역할 제고에 관한 타 부처 간(국토교통부 수자원정책과, 환경부 수도정책과, 토양지하수과), 중앙부처-지자체 간, 지자체-민간 간의 협력 방안
- 물안보 확보를 위한 지하수역할 인지 제고에 공공 및 민간 홍보 방안

## (2) 토양지하수 新패러다임 정책에 기반한 기술 및 산업

### (가) 토양환경 기술 및 산업

#### ① 토양환경기술현황 및 전망

- 토양환경관련 기술에 대한 정의 및 범위, 분류체계를 도출하여 토양환경기술개발 방향성을 설정할 필요가 있다.
  - 토양 고유의 질·기능을 보전하고, 토양 자원을 활용할 수 있도록 다양한 위협인자에 대응하는 토양환경기술개발의 방향성 분석 및 정립이 필요하다.

표토의 정의	적용 대상범위	관련 기술영역
- 표토는 대부분의 국가에서 0층 +A층으로 정의 - 즉 물, 공기 및 부식물질이 섞여진 미생물 혹은 작은 생물에 의해 생기를 부여 받은 대개 매우 거무스름한 빛깔을 띠는 정착되어 있는 지면의 상층(두께 약 20~40cm)으로 정의하는 것이 적절할 것으로 판단	- 높이 1m 이상의 절토 또는 성토가 행하여지는 경우 - 절토 또는 성토의 면적이 1,000m <sup>2</sup> 이상인 경우 - 채굴이 완료된 광산의 경우	① 기존 토양오염관리기술 ② 새로운 정책패러다임에 따른 토양질 향상 기술

<그림 3-85> 토양의 정의, 대상범위에 따른 관련 기술 도출

- (법·정책 변화) 토양오염 복원 관련 정책 중심으로 오염토양의 관리에 초점을 맞춤 정책에서 토양의 환경질 관리를 위한 표토 등 관리 확대 중이다.
  - 토양환경보전법 제정( '95)
    - 토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해(危害)를 예방하고, 오염된 토양을 정확하

는 등 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 토양생태계를 보전하고, 자원으로서의 토양 가치를 높이며, 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 한다.

- 토양기능관점 정책 추진 확대

- 표토보전 등 기후변화에 대비한 토양환경 관리범위 확대 추진을 위해 표토보전대책 수립으로 표토보전 및 유실방지체계 도입, 기후변화에 따른 토양환경변화 및 대처방안 마련, 준설토 및 폐기물 재활용부지 관리를 강화하고 있다.
- 이에 따른 토양오염의 조사 및 정화에 집중된 정책으로 유한(有限)자원인 토양의 가치를 보전하고 상승시키기에는 근본적인 한계가 존재한다.

- 급격한 국가발전에 따라 다양한 개발 사업이 추진되어 녹지면적의 감소, 생태계훼손 및 단절 등 전 국토의 자연환경훼손 문제를 초래했다.

- 대도시·읍면지역의 환경 및 경관 악화, 산림, 구릉지, 하천변, 연안역의 개발로 자연환경이 훼손되었다.
- 20년 전에 비해 산림 1.5%, 농지 15.6% 감소하여 녹지면적이 감소하는 추세를 보인다.

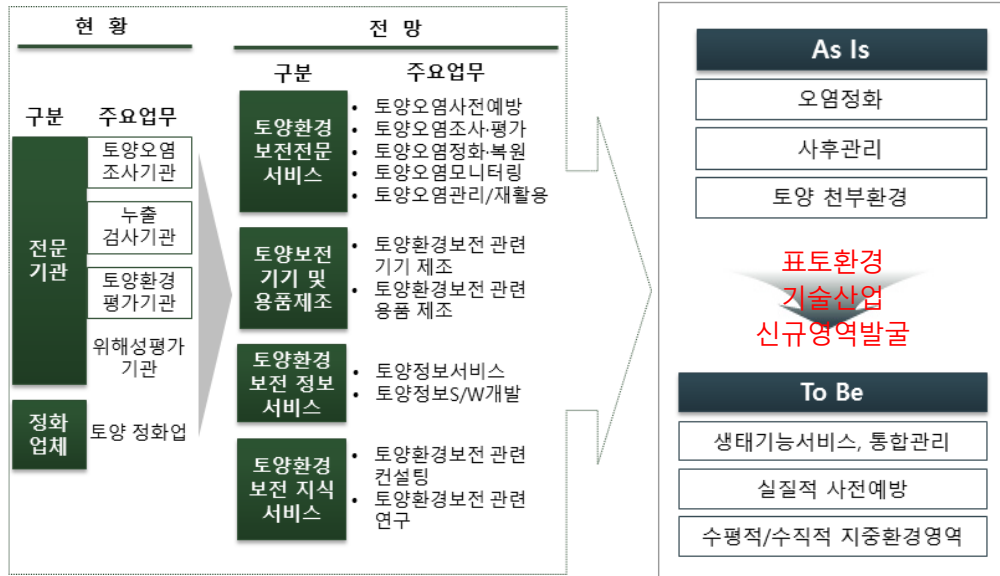
○ (미래토양환경기술) 토양 기능회복과 토양의 원기능을 질적·양적으로 회복하는 기술이 요구된다.

- 토양정화 고도화 기술로는 유류와 중금속 오염토양을 정화하고 동시에 토질을 개선, 복원하는 복합처리기술 등이 있다.

○ (산업) 오염조사 및 정화 중심 산업에서 국내 토양관련 전문사업자로 산업 확대 및 인프라 구축이 필요하다.

- 토양시장의 글로벌 성장세에 따른 국내기업의 해외 진출 가속화 및 효율적 진출 등 국내 토양분야 시장 활성화를 위한 지원 필요성이 확대되고 있다.

- 생태기능서비스 및 통합관리, 실질적인 사전예방, 수평적·수직적 지중환경영역 등 현행 토양환경관리 산업의 전망상 세부사업내용과 연계해야한다.



자료 : 토양지하수환경산업육성전략(2014)의 산업영역을 연구진이 재구성

<그림 3-86> 표토환경 기술산업 신규영역 발굴

## ② 기술산업 신규추진영역 진단

- 토양생태계, 통합환경관리, 토양지하수 기능 생태계 서비스 가치 활용 · 향상으로 토양정책의 새로운 방향을 설정할 때, 환경매체 중 토양매체의 사후관리 특성을 고려한 사전예방정책을 뒷받침할 필요기술이 정책을 뒷받침해야한다.
  - 토양오염조사 및 정화영역에서 수평적 토양환경관리영역에서 오염 및 비오염 토양의 관리 기술로 확대해야 한다.
  - 기존 산업단지, 매립지, 폐광산 등 → 비오염 손상 토양환경
- 대표적인 토양환경관리 프로그램의 기술적 유관 프로젝트를 살펴보면, 토양오염과 생태위해성 일부영역을 제외하고, 토양생물다양성, 기후변화대응, 토양피복 문제 등의 기술적 지원이 필요한 영역으로 보인다.

<표 3-64> LIFE 프로그램대비 기존 추진영역분석 및 신규추진 시사점

중점 분야	내용 및 수행 프로젝트	GAIA 추진여부	신규성 등 검토
Soil Sealing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soil Sealing의 생태학적 악영향을 ‘대수층의 흐름 저해’, ‘식량안보에 영향’, ‘지구 탄소순환 저해’, ‘열섬현상’ 대응</li> <li>- 규제 통한 soil sealing의 완화와 녹색옥상정원 등 도시경관의 녹색화, 기존에 sealing의 제거 등을 제안</li> <li>- 도시 공간계획(Urban Spatial Planning) 통한 Soil sealing의 사전 제한</li> </ul>	해당사항 없음	정책사각지대
Soil Biodiversity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 높은 토양의 생태적 다양성은 토양자원의 유실을 막는데 중요한 요소라고 관별하고 있으며, 산성화의 지표로써 토양의 생태적 다양성을 측정함</li> <li>- 토양의 생태적 다양성 위해 invasive plant의 식생 등 추구하고 있음</li> <li>- 토양 다양성을 즉각적으로 측정할 수 있는 모니터링 probe 기술 개발함</li> </ul>	해당사항 없음	기존 토양위해성평가가 인체건강에 집중되었음 토양생태(미소생물 등)의 다양성 확보 필요
Soil Carbon Capture	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 세계적으로 토양에는 2,500GT의 탄소가 포함되어 있다고 연구되고 있으며 토양, 숲, 농업을 기후변화 분야와 밀접하게 연계시키고 있음</li> <li>- 황폐화 되었던 습지에 다시 수분을 제공하여 carbon sink로써의 기능을 제고함</li> </ul>	해당사항 없음	기존 토양의 온실가스 감소효과 연구(KEI 등)
Soil Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유럽 지역의 토양 모니터링 방법의 표준화 및 통합 정보시스템인(European Soil Information System) 통한 정보의 공유에 대해 강조함</li> <li>- 정책의사결정 지원 할 수 있는 모니터링 tool, 토양 생태 다양성, 미래예측 모니터링 등 다양한 모니터링 기법을 개발중임</li> </ul>	토양오염조사 및 모니터링 기술개발은 다수 추진	표준화 등 과학원의 업무와 연계한 기술개발이 요구됨
Water and Soil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 물분야와 토양 분야의 통합적인 접근 방법을 취하고 있으며, Soil Thematic Strategy는 이러한 통합적인 접근 방식이 기존의 방식보다 그 효율이 3배 이상 높은 것으로 파악하고 있음</li> <li>- 하천, 습지의 생태학적 복원을 통한 수질제고, 홍수방지, 수문학적 균형 등에 대한 프로젝트를 진행하고 있음</li> </ul>	수계-지하수 수질영향에 대한 연구 일부 수행	토양표토침식에 따른 영향은 연구필요

<표 3-64의 계속>

중점 분야	내용 및 수행 프로젝트	GAIA 추진여부	신규성 등 검토
Sustainable Agriculture	- 토양의 침식과 이용, 식량안보적인 측면에서 농업의 중요성을 인식하고, 적정사용의 비료사용 방법론, 토양·작물에 따른 적정 농업 방법론 - 가축 분뇨 및 작물 쓰레기 통제 관리 기법에 대한 관리 방법론 연구 - 농업용 Run-off water, 살충제 관련 기법에 대해 연구를 중시함	토양침식 일부연구영역 추진	다양한 토양 비점오염원 관리 및 지속가능한 토지이용에 관한 연구 필요
Land Contamination	- 광산, 매립토양 등에 대한 생물학적 복원, 모니터링 기법 등을 연구지원함 - 오염과 토양복원에 대한 사회적 비용과 이득을 산정하는 프로젝트 진행함 - LIFE는 본디 다양한 환경분야를 다루는 프로그램이기에 토양 뿐 아니라 타 환경 분야 와도 연계된 통합적 정책 방법을 적용함	토양정화 실증사업에 다수 수행됨	(기존) 토양오염정화 → (신규) 경제적 토양정화(지하수 제외) 및 토양생태복원 중심 사업

③ 필요영역(안)

- 토양환경기술 분류체계는 다음과 같다.

<표 3-65> 토양환경 추진정책별 토양환경 필요기술

구분	기술영역	세부기술내용
S1	기후변화 감축 및 적응기술	<b>토양환경내 기후변화영향평가기술</b>
		- 식생 작목별 전과정 평가 기술
		- 탄소순환형 소재 개발 기술
		- 온실가스통계, 탄소계정 및 감소 기술
		- 토양환경재료 탄소성적표시 기반 구축 기술
		<b>탄소유출입 조절 및 기후변화조절기술</b>
		- 탄소흡수원 증진을 위한 토양생태환경 관리기술
		- 토양생태 잠재편익 평가 모델 개발
		- 온실가스 배출량 감소 및 흡수원 확대 복원 기술
		<b>토양 기후변화물질의 토양집적 평가 및 기술</b>
		<b>토양 기후변화물질의 발생예측 평가 기술</b>
<b>기후변화와 토양의 생물다양성 평가, 보전 및 지속가능한 이용 기술</b>		

<표 3-65의 계속>

구분	기술영역	세부기술내용
S2	토양기능회복기술	<b>오염부지 토양의 기능 회복(resilience) 기술</b>
		- 기후변화 대비 토양의 탄소저장 극대화 및 건강한 토양 생태계 복원 기술
		- 정화부지의 토양기능 회복 및 토양질 개선기술
		<b>오염부지의 건강성·위해성 진단(인체, 생태) 및 통합위해성평가 시스템의 개발 기술</b>
		- 오염부지의 생태 및 인체 위해성 평가지표 정량화·표준화 기술
		- 부지특성을 고려한 생태건강성평가를 위한 효율적인 평가지표종 선정 및 평가방법
		- 화학적, 독성학적, 생태학적 방법 등을 통합한 복합 평가시스템 개발 기술
		<b>오염물질특성에 따른 위해성·독성 평가기법</b>
		- 오염부지내 우선관리대상 오염물질 및 신규오염물질의 위해성·독성평가 기술
		<b>지하활용 공간 건강성 평가 지수</b>
		- 지중환경(토양, 암반 등)의 건강성평가 지수 개발 기술
		- 인공 지중환경(지중 인프라)의 서비스 지수 개발 기술
		- 지하활용 공간 건강성 평가 표준 시스템 개발 기술
S3	토양침식 방지·복원기술	<b>토양침식·유실 평가 기술</b>
		- 건설활동, 산림관리 등에 따른 토사재해 심화방지기술
		- 토양침식량 산정 모형개발 및 모니터링기술
		<b>표토유실 및 오염원 추적·관리 최적기술</b>
		- 모형개발-실험유역 운영-최적 설계 기술
		- 고정밀도 지표지하수 연계 3차원 수리·지질 수치모형 개발 기술
		- 다기능 실험유역 설계 및 운영을 위한 인위적 오염원 추적 실증 및 관리기술
		- 표토유실 방지·오염원 추적·관리 및 제거를 위한 구조적(침사지, 정화지 등) 비구조적(표토유실량 및 오염원 유해도 시공간적 매핑 등) 최적 기술 개발
		<b>토양침식·유실저감기술</b>
		- 교통, 건축시설 등 개발과정에서 토사유출저감 기술
		- 사토의 재생처리 기술
		- 폐기물과 혼합된 토사도 일정한 기준 이하일 때는 분리하여 복토재 활용기술
		- 재생골재, 폐자재(벽돌, 블록 등) 잔사 생산기술
		<b>준설토 등의 제거, 처리기술</b>
		- 준설토 토양안정성 평가 기술
		- 오염된 준설토 정화(처리)기술
		- 하천오니 원위치에서 제거하는 준설투리 기술
		- 하천오니 봉입 원위치처리기술

<표 3-65의 계속>

구분	기술영역	세부기술내용
S4	토양 생물다양성의 보전과 지속 가능한 이용·확보기술	훼손된 생태계를 복원하기 위해 다학제적인 분야(생태, 환경, 생물, 토목, 조경, 도시, 인문지리, 자연지리, 경제, 디자인, 예술 등) 접근을 바탕으로, 생태환경계획·설계, 복원시공, 유지관리모니터링 기술
		토양의 생태계서비스 조사 및 평가 기술
		EIA에 토양의 생태계서비스 기술
		토양의 생물다양성 조사 및 평가 기술
		토양생태환경 감시 및 예측 기술
		생물자원 발굴 및 분석 기술
		생물자원 보존·관리 기술
		생물자원 표준 관리 기술
		ABS 대응 지원 서비스
		유용소재 표준화 기술
		생물자원 활용 환경정화 기술
		생물자원 활용 생태복원 기술
		S5
객토, 성토, 절토 기준에 따른 인위토양관리기술(농지법 토양개량보전)		
토양개량제 개발 기술		
토양의 유기물질 조사 및 평가 기술		
토양멀칭재료개발 및 토양멀칭기술		
그밖의 토양개량기술		
S6	토양차폐관리기술	토양의 다짐·차폐 조사 및 평가 기술
		토양의 다짐·차폐 저감 기술
		토양피복재료 및 대체제 개발 기술
		도시자연배수시스템 개발(식생수로, 침투도랑) 기술
		토양의 다짐·차폐 공학적 처리기술(공간녹화, 식생여과대, 식생체류지)
S7	토양산성화·염화방지기술	토양의 산성화·염화 조사 및 평가 기술
		토양의 산성화·염화로 인한 침식 저감 기술
		토양 사막화 방지 기술
		토양 염류집적 기술
		토양 구조관리 및 물리성개선 기술
		토양배수 유기물과 양분관리 연구

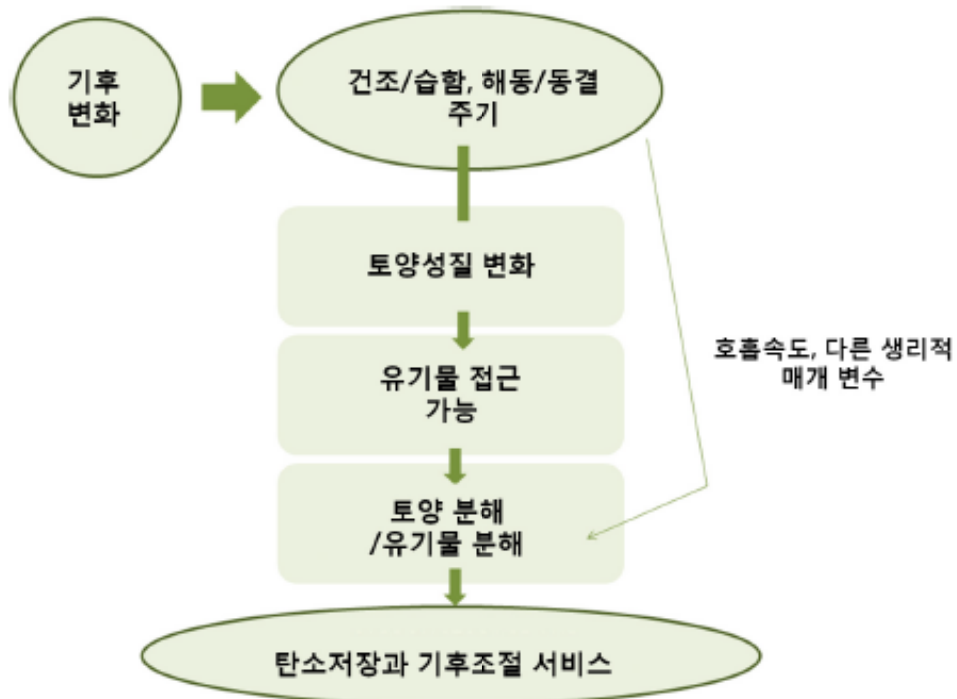
<표 3-65의 계속>

구분	기술영역	세부기술내용
S8	토양사태(land slide)평가·방지 기술	지하유류 및 화학물질보관시설 피해에 의한 토양오염처리 기술
		도로 및 시설 등의 훼손 저감 기술
		경사지 사태 평가 및 예측시스템 개발 기술
		토양사태 방지기술 (배수시설설치, 사면지 구조관리, 옹벽 구조물 등 토목처리 기술)
		토양공동 충전기술
S9	법, 제도·정보화 기술	토양·지하수 상태, 침식, 유기물질, 다짐·차폐, 산성화·염화, 사태 정보화 기술
		토양환경 통합의사결정기술 (제4차 산업혁명관련 토양생태환경의 사전적 관리기술)

### ■ S1 기후변화 감축 및 적응기술

○ 기술개념

- 토양 및 토양유기물내 탄소저장 및 기후조절기능을 극대화하는 기술



자료: 박용하(2012)

<그림 3-87> 기후변화와 토양탄소저장관계 모식도

○ 기술개발내용

- 토양환경내 기후변화영향평가기술
  - 식생 작목별 전과정 평가 기술
  - 탄소순환형 소재 개발
  - 온실가스통계, 탄소계정 및 저감기술
  - 토양환경재료 탄소성적표시 기반 구축
- 탄소유출입 조절 및 기후변화조절기술
- 토양에서의 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등 기후변화물질의 토양집적 평가 및 기술 개발
- 토양에서의 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등 기후변화물질의 발생예측 평가
- 기후변화와 토양의 생물다양성 평가, 보전 및 지속가능한 이용기술

■ S2 오염부지에서의 사람과 생태계 건강성 증진기술

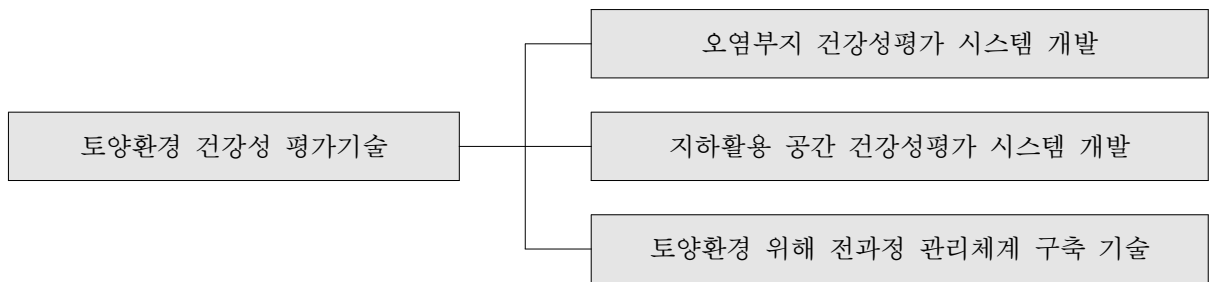
○ 기술개념

- 토양오염의 생태계 위해성 평가
- 오염부지 토양의 기능 회복(resilience)

○ 기술개발내용

- 오염부지의 건강성·위해성 진단(인체, 생태)과 지하활용공간의 위해성(인체) 및 안전성 진단을 위한 위해성평가 체계를 구축하고 활용할 수 있는 통합위해성평가 시스템의 개발
- 오염부지의 생태 및 인체 위해성 평가지표 정량화·표준화 기술
  - 부지특성을 고려한 생태건강성평가를 위한 효율적인 평가지표종 선정 및 평가방법
  - 화학적, 독성학적, 생태학적 방법 등을 통합한 복합 평가시스템 개발
- 오염물질특성에 따른 위해성·독성 평가기법 개발
  - 오염부지내 우선관리대상 오염물질 및 신규오염물질의 위해성·독성평가 기술
- 지하활용 공간 건강성 평가 지수개발
  - 지중환경(토양, 암반 등)의 건강성평가 지수 개발
  - 인공 지중환경(지중 인프라)의 서비스 지수 개발

- 지하활용 공간 건강성 평가 표준 시스템 개발



<그림 3-88> 토양환경 건강성 평가기술

### ■ S3 토양침식·유실 방지기술

#### ○ 기술개념

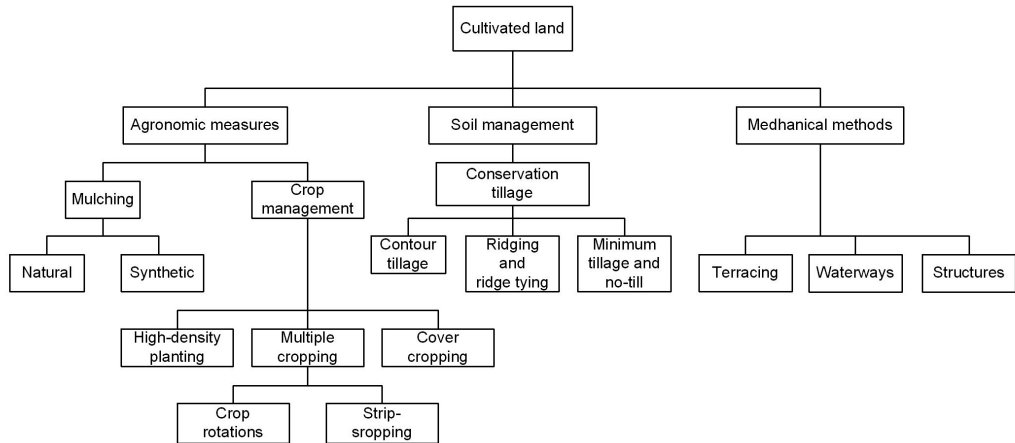
- 이용용도별: 산림, 농경지, 도시지역 등 토양침식·유실 평가 기술
- 이용용도별: 산림, 농경지, 도시지역 등 토양침식·유실 저감 기술
- 건설 굴착토, 하천 오염 준설토 등의 제거, 처리 기술

#### ○ 기술개발내용

- 토양침식·유실 평가
  - 건설활동, 산림관리 등에 따른 토사재해 심화방지기술
  - 토양침식량 산정 모형개발 및 모니터링기술
- 모형개발-실험유역 운영-최적 설계 기술 실용화 단계별 접근을 통한 표토유실 및 오염원 추적·관리 최적기술
  - 고정밀도 지표-지하수 연계 3차원 수리·지질 수치모형 개발(표토유실량 산정 및 오염원 추적)
  - 다기능 실험유역 설계 및 운영을 통한 인위적 오염원 추적 실증 및 관리기술 개발
  - 표토유실 방지·오염원 추적·관리 및 제거를 위한 구조적(침사지, 정화지 등)·비구조적(표토유실량 및 오염원 유해도 시공간적 매핑 등) 최적 기술 개발

- 토양침식 · 유실저감기술

- 교통, 건축시설 등 개발과정에서 토사유출저감 요구



자료: El-Swaify et al,(1982)

<그림 3-89> 경작지에서의 토양침식 저감방안

- 사토의 재생처리 기술

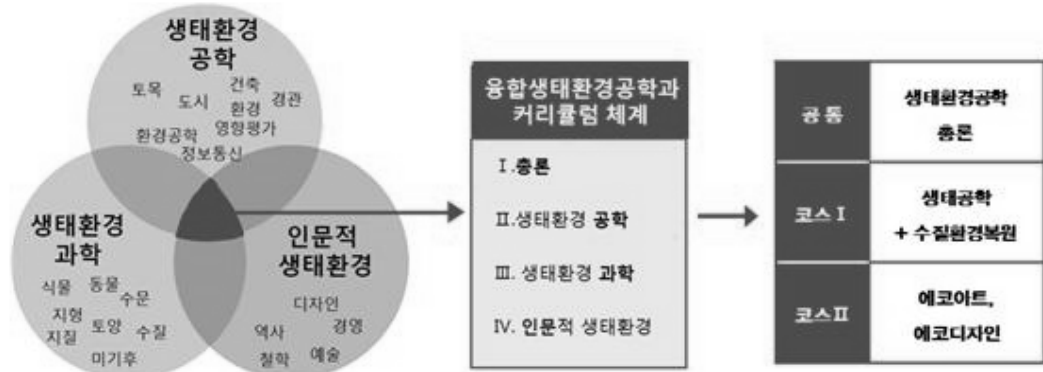
- (필요성) 잔토는 현장에서 성토재로 이용하거나 타지역으로 운반되는 실정이나 건설공사의 대형화로 인한 잔토발생량 증가와 도시화, 지역이기 등으로 인해 잔토를 수용할 부지의 확보가 어려운 실정으로 잔토의 재활용은 반입지 확보 및 기타 환경적 문제의 해결에 있어 중요하며 재활용 기술 확보
- (선별기술) 타 폐기물과 혼합된 토사도 일정한 기준 이하일 때는 분리하여 복토재 활용기술
- (혼합 기기 개발) 재생골재의 생산과정에서 배출되는 잔사의 활용을 위하여 적정 혼합비율과 혼합할 수 있는 기기 이용
- (잔사의 생산기술) 적극적인 방법으로서 조적조의 건물에서 배출되는 폐자재인 벽돌, 블록 등을 원료로 하여 잔사를 생산기술

■ S4 토양 생물다양성의 보전과 지속 가능한 이용 기술

○ 기술개념

- 토양생물다양성 서비스 기술과 환경생태융합기술(융합생태환경학제 개념을 적용한 생태회복개념)
- 훼손된 생태계를 복원하기 위해 다학제적인 분야(생태, 환경, 생물, 토목, 조경, 도시, 인

문지리, 자연지리, 경제, 디자인, 예술 등) 접근을 바탕으로, 생태환경계획·설계, 복원시공, 유지관리모니터링 기술



자료: 상명대학교 홈페이지  
(<https://grad.smu.ac.kr/user/indexSub.action?codyMenuSeq=3255551&siteId=grad&menuUIType=tab>)

<그림 3-90> 상명대 융합생태환경공학 개념

○ 기술개발내용

- 토양의 생태계서비스 조사 및 평가
- 환경영향평가에 토양의 생태계서비스 반영
- 토양의 생물다양성 조사 및 평가
- 토양생태환경 감시 및 예측 기술

■ S5 토양의 유기물질 보전기술

○ 기술개념

- 토양의 품질 향상 영역 관련 기술

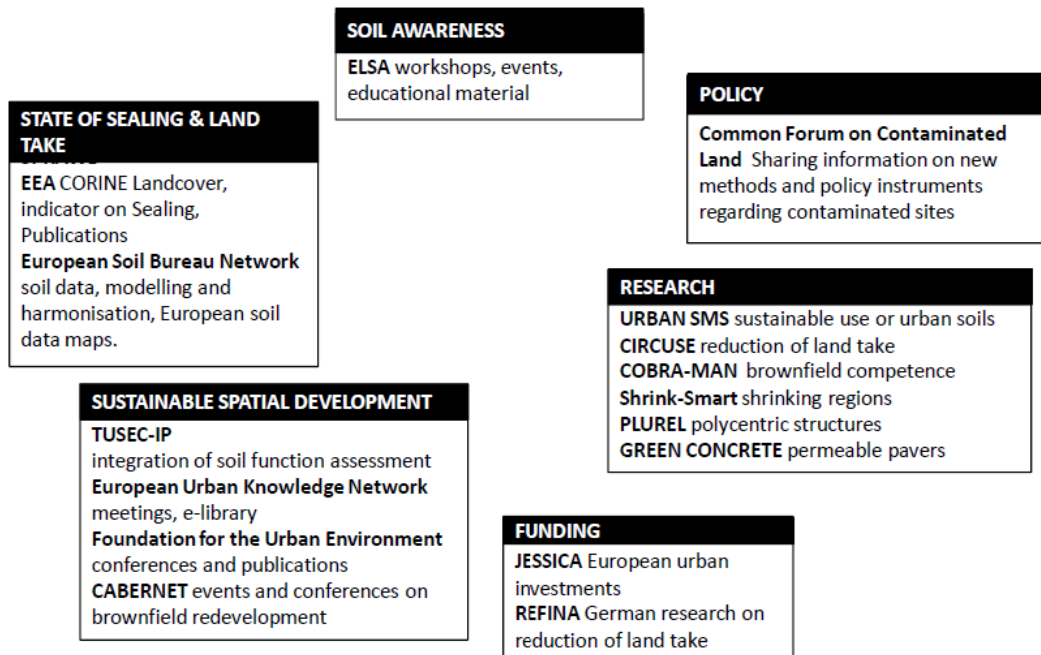
○ 기술개발내용

- 경사지 토양보전과 관리기술
- 객토, 성토, 절토 기준에 따른 인위토양관리기술(유실방지 등 농지법 토양개량보전기술)
- 토양의 유기물질 조사 및 평가
- 토양멀칭재료개발 및 토양멀칭기술

## ■ S6 도시지역 토양차폐 저감기술

### ○ 기술개념

- 토양피복 평가, 대체제개발, 표토 투수층시공(EU, umweltbundesamt)



<그림 3-91> 도시지역 토양차폐 저감기술 개념

### ○ 기술개발내용

- 토지이용유형별 토양의 다짐/차폐 조사 및 평가
  - 물순환, 탄소발자국, 토양다짐 위험도평가, 표토유출 공간 설계
- 토양피복재료 및 대체제 개발
  - 토양 및 유사토양 소재개발을 통한 유실방지기술개발
  - 토양의 유실방지 고정화 재료기술
- 도시자연배수시스템 개발(식생수로, 침투도랑)
  - 토양내 물순환 회복기술
  - 토양 수분의 보전 기술
- 토양의 다짐·차폐 공학적 처리기술(공간녹화, 식생여과대, 식생체류지)

- 토양의 다짐 및 차폐 조사평가기술
- 토양의 다짐 및 차폐 제어기술

## ■ S7 산성화·염화방지기술

### ○ 기술개념

- 식물양분의 용해성, 유효도에 대한 영향, 토양 생물, 미생물의 분포와 활성, 식물 종의 분포와 생육성, 입단구조의 형성과 유지를 관장하는 환경관리기술

### ○ 기술개발내용

- 토양 사막화 방지기술
- 이용용도별; 해안, 농경지, 산림 토양의 산성화·염화 조사 및 평가
- 토양 염류집적 제어기술
- 토양 구조관리 및 물리성 개선기술
- 토양배수관리 기술
- 유기물과 양분관리기술

## ■ S8 사태방지기술

### ○ 기술개념

- 토양, 지질 매체의 지속적 변형 및 물리적 구조와 재해발생유형 및 규모에 대한 관측을 체계화 하는 사태방지기술

### ○ 기술개발내용

- 경사지 사태 평가 및 예측시스템 개발
- 도로 및 시설 등의 훼손 저감기술
- 배수시설설치, 사면지 구조관리, 옹벽 구조물 등 토목처리 등 토양사태 방지기술
- 토양공동 충전 등 물리적 토양사후관리기술

## (나) 지하수환경 기술 및 산업

### ① 지하수환경기술현황 및 전망

- (지하수) 오염정화의 정책한계 극복을 위한 원위치정화기술을 확보하고, 새로운 지하수관리 정책에 기반한 유역관리에서 지표수-지하수 통합환경관리 기술개발이 요구되고 있다.
- 물 부족 심화로 수자원 무기화, 국가간·지역간 분쟁 발생 우려로 획기적 변화가 없다면 2050년에는 20억 이상의 인류가 물부족 상태에 직면할 것으로 경고(세계수자원 보고서)하고 있고, 물·식량 확보로 인한 생태계 변화 등에 대응이 필요하다.
  - 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙( '94) 제정을 통해서 지하수의 수질보전 및 정화에 관한 사항을 운영 중이다.
  - 환경부는 지하수수질기준 제정(총 19개, 일반오염물질 4개, 특정오염물질 15개), 지하수 수질오염방지 및 수질검사, 먹는샘물 및 상수원용 지하수 관리 업무를 수행하고 있다.
  - 지하수 수질 측정망 설치·측정계획 수립 및 측정기관 지도·감독 · 국가지하수수질전용 측정망 설치·운영 · 측정자료의 대외공표 · 환경오염 측정·분석기법의 개발 및 표준화(국립환경과학원) · 수질오염공정시험기준 제·개정 및 운영 · 토양지하수정보시스템을 통한 측정자료 통계·분석·처리한다.
  - 지하수 수질기준은 지하수를 이용하기 위한 목적 이외에도 지하수 오염방지 및 오염된 지하수를 정화하기 위한 목적에 적합하도록 지하수를 관리하기 위하여 총 19개 항목(일반오염물질 4개, 특정오염물질 15개)이 설정되어 있다.
- 유역통합적인 지하수 관리 기술 요구가 증가될 전망이며, 다음과 같다.
  - 지하수의 관리 및 보호를 위한 지표수-지하수 통합 비점오염원 관리기술
  - 하천 및 지하수 오염원의 추적 map 구축 및 모니터링 기술
  - 생태유량산정을 통한 지표수-지하수 통합관리기술
- (먹는물) 먹는샘물관리 지역의 지하수환경관리, 좋은물 생산 및 이용기술개발이 요구된다.
- 먹는물 관리법 제정( '95)과 함께 '95년에 먹는 샘물을 시판하기 시작했다.
  - 샘물 등의 개발 및 보전을 위해 샘물보전구역 지정 및 관리, 샘물 개발허가 등의 관련 제도를 마련하였다.
  - 먹는물에 먹는 해양심층수 추가하였으며,
  - 먹는샘물에 대하여 부과하는 수질개선부담금의 증명표지제도를 도입하여 먹는샘물의 무

자료 거래를 방지하였다.

- 시·도지사는 샘물의 수질보전을 위하여 샘물보전구역을 지정 및 각종 오염유발시설의 설치 행위를 금지하여 샘물의 오염을 방지하였다.
- 먹는물 관련 정책은 먹는물 안전성확보와 수질개선이 중점적으로 추진되어 왔다.
  - 먹는물 수질기준 항목 59개 항목 및 먹는물 수질감시항목(먹는물에서 검출수준이 매우 낮아 현재로서는 먹는물 수질기준으로 관리할 필요는 없으나 먹는물 안전성 확보를 위해 검출상태 감시하는 항목) 27개 지정·운영( '15) 중이다.
  - 먹는샘물의 수질기준은 염소소독 등 화학적 처리가 허용되지 않는 먹는샘물 처리과정의 특수성 고려하여 미생물에 관한 기준 보완, 50개 항목( '15)을 운영중이다.
  - 수질개선부담금은 공공의 지하수자원을 보호하고 먹는물의 수질개선을 위해 1995년 「먹는물관리법」의 시행으로 도입/2008년 「먹는물관리법」 개정(' 08.3.21)에 따라 먹는샘물 제조 및 기타샘물 개발자는 취수량에, 수입판매업자는 수입량에 대하여 각각 부과된다.
  - 먹는물 공동시설 대부분이 지표수와 유사한 시설로서 오염원에 쉽게 노출됨에 따라 시설 주변의 청결상태 불량과 관리 소홀로 나타나는 미생물 기준초과로 시설관리 필요성이 확대되었다.
  - 정수기의 기준과 규격은 환경부 고시로 정하고 있으며, 정수기를 수입·제조판매 하고자 하는 자는 정수기품질검사기관의 품질검사를 받아 합격한 제품에 대해 시·도지사에게 신고 후 판매하도록 되어 있다.
- 고품질의 물 확보 기술 개발 요구가 증가하고 있으며, 관련 기술은 다음과 같다.
  - 지하수 관리 시스템 개발
  - 물 위해성 분석 및 평가 서비스기술
  - 담수 확보(해수, 지하수, 지표수 등) 및 저장 설비(댐, 저수지 등 차수설비) 개발

## ② 기술산업 신규추진영역 진단

- 지표-지하수 통합환경관리기술 사례로는 지하주입정을 들 수 있으며, 다음 <표 3-66>와 같다.

<표 3-66> 지하주입정(Underground Injection Well) 분류체계

Class	정의	예시 및 요구사항
<p>Class I Industrial &amp; Municipal Waste Disposal Wells</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산업 및 도시 폐기물을 최하부 형성층 아래에 주입하는 것으로, ‘지하식수원(Underground Source of Drinking Water: USDW) 유공의 1/4 mile 지점 내부 정도 의 위치를 규제함</li> <li>- 40 CFR 261에 정의되어 있듯이 유해 폐기물을 최하부 형성층 아래에 주입하는 것으로, ‘지하식수원(USDW)’ 유공의 1/4mile 지점</li> <li>- 대수층 하부층 지점, 지하식수원(USDW) 유공 1/4 mile 지점에 방사성 폐기물질 주입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 화학물질 회사가 ‘지하식수원(USDW)’에 비유해성 비료폐기</li> <li>- ‘지하식수원(USDW)’ 하부에 2차 처리된 도시 폐기물 처리</li> <li>- ‘Rocky Mtn Arsenal ‘ 깊이 12,000+ft에서 살충제 및 신경가스를 매립. 지진 등 사건 으로 향후 유리 되거나 배출될 수 있음</li> </ul>
<p>Class II Oil and Gas Related Wells</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 석유·가스 생산 관련 유체주입</li> <li>- ‘석유 및 가스’ 회수작업 증대를 위한 유체의 주입 : brine, 수분, 스팀, 이산화탄소를 기름을 포함하고 있는 층에 주입 하여 기름 회수율이 높아지도록 함</li> <li>- 천연가스 저장소와 연결되거나 ‘석유·가스’ 생산지와 연결 되어 표면으로 유출된 유체의 폐기, brine은 석유·가스 생산시에 표면으로 배출됨</li> <li>- 표준 온도 및 압력에서 액체 상태인 탄화수소 저장체 주입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 압력 유지를 위한 가스의 주입</li> <li>- 비 압력화 된 저장고의 2차 범람</li> </ul>
<p>Class III Mining Wells</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Class III은 우라늄, 염분, 구리, 황과 같은 광물을 채취할 때, 유체를 넣어 광물을 액체화하는 기능을 함</li> <li>- 광물 추출을 위한 유체의 주입</li> <li>- 구리와 우라늄의 액체화한 용액의 채굴</li> <li>- 염분, 탄산칼륨 용액 채굴</li> <li>- 황산 복원을 위한 Frasch Process를 사용한 증기의 주입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 식음에 적합한 대수층의 얇은 ‘Roll-front’ 부위에 집적된 우라늄 용액의 채굴로써, 다양한 주입과 추출정을 이용</li> <li>- 다양한 주입과 관정 추출을 이용해 In-situ에서 탄산칼륨 복원 진행</li> <li>- Frasch Process를 사용한 증기 주입으로 걸프해안 지역 층상 집적층으로부터 황산 복원</li> </ul>
<p>Class IV Shallow Hazardous and Radioactive Injection Wells</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ‘지하식수원’ 을 포함한 위에서 언급된 형태 등에 유해물질 폐기 또는 방사성 쓰레기의 폐기. 40 CFR 144.13(c) 조항에서 허락되지 않는 이상 건설 및 시설유지 등은 금지</li> <li>- 유해물질을 포함한 폐수를 ‘지하식수원(USDW)’에 주입할 경우에는, EPA 규정의 일부분 또는 주에서 허락한 CERCLA 또는 RCRA 정화활동으로 HSWA 7010(b) 기준에 부합해야함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전자 제품 제조과정에서 유출된 용제(목록화 된 유해물질)가 주차지역의 지하로 주입되었을 경우(금지됨).</li> <li>- 40 CFR의 261.21, 261.22, 261.23, 261.24 규정 상 폐기물이 유해물질로 규정되는 얇은 폐기 관정으로 산업 과정에서 흘러나온 폐기물이 흘러들어 가는 경우(금지됨)</li> <li>- 철로 처리 시설의 정화로부터 폐수가 펌핑되어 다시 주입된 경우로써, 이 경우에는 RCRA가 허가한 정화활동에 부합해야만 함</li> </ul>

<표 3-66의 계속>

Class	정의	예시 및 요구사항
Class V Shallow Non-Hazardous Injection Wells	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 모든 기타 외의 관정으로써, 아래와 같은 사항을 포함하고 있지만 아래와 같이 제한되지는 않음</li> <li>- 관개수에서 이용된 관정, 오수구덩이, 비유해성 산업 폐기 시스템이 ‘지하식수원(USDW)’에 투입된 경우, ‘빗물(Storm water) 통제관정’, 채굴된 모래의 ‘채굴전 충전(Backfill)’, 재충전관정, brine 추출 관정, 대부분 관정은 알고 대부분 표면 대수층 통과</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주차장의 건조 well, 빗물(run-off) 관리 시설이 부재한 도시·마을 지역으로 해당 빗물이 유해물질이 아닐 경우.</li> <li>- 침전 및 해수침투를 예방하기 위한 처리하수의 재충전</li> <li>- 집합 거주지와 연관된 배수로로 하루당 20명 이상과 연계된 곳</li> <li>- LUST, RCRA, CERCLA 부지에 처리된 물이 재주입될 시, 관정이 재충전되는 경우로, 유체가 40 CFR 261 규정에 따라 무해해야함</li> </ul>
Class VI Geologic Sequestration Wells	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Class VI은 지하 암반 지층에 장기적으로 이산화탄소를 매립하거나 ‘지질학적 격리’에 이용</li> <li>- ‘지질학적 격리’는 이산화탄소가 대기중으로 배출되는 것을 방지하여 기후변화에 대응할 수 있게 해주는 기술임</li> <li>- Class VI에 해당되는 지 여부는, 관련 지하 이용이 ‘지하식수(USDW)’ 보호와 연관이 있는지 판단하는 것이 관건임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이산화탄소 주입부터 저장까지 모든 과정에 대한 모니터링, 주입 후 과정 관리</li> <li>- 이산화탄소 매립 위한 건설 활동 시에 GS 프로젝트에 위배되지 않는 자재를 사용함</li> </ul>

자료 : EPA, Technical Program Overview: Underground Injection Control Regulation, 2002, EPA,UIC Website

### ③ 필요영역(안)

- 지하수기술 영역은 지하수정화, 먹는샘물, 지하수 원수개선 등에 집중하고, 사후적 지하수 수질관리 기술영역이 대부분이다.
- 따라서, 사전예방적 수질보전관리, 지하수이용기술, 지하수 통합관리(수계-지하수), 지하수 자원화, 지하수영향 시설 중심 지하수 보전관리기술 등이 필요하다.

<표 3-67> 지하수 추진정책별 지하수환경 필요기술

추진부문	추진과제	추진대책	신규추진영역
사전에방적 지하수수질 (및 지하수 의존 생태계) 보전·관리	지하수 오염원 관리	- 지하수 오염원 관리 - 지하수 개발·이용시설 관리 - 지하수 오염물질 관리	
	지하수수질 관리체계 정립	- 지하수 수질기준개선 - 수질관리 다원화 및 등급별 관 리 추진 - 농·축산지역의 지하수수질관 리 강화	- 지하수수질관리를 위한 환경 기준 설정 및 수질목표 설 정·관리제 도입 - 도시지역 오염원 및 위해요 소 발굴 및 관리방안 마련
	지하수 수질측정·검사	- 지하수 수질측정망 확대 운영 및 수질감시 선진화 - 지하수수질 정기검사 합리적 개선	- 지표수-지하수 연계 수질측 정망 구축 및 운영
	샘물/보전구역 관리	- 샘물보전구역 지정 활성화를 위한 제도 마련 - 먹는물공동시설 수질관리 강 화	
	신규 지하수환경 영향요소 관리	- 지열이용에 따른 지하수 수질 및 환경 관리 - CCS관련 지하수환경 관리 - 자연방사성물질 함유 지하수 관리	- 지중환경민감성 평가 및 지 중환경 관리체계 정립 - 지중환경민감성을 고려한 지 하수 개발이용 사업 및 시설 관리
지하수 이용 가치 제고를 위한 정책 선진화	취약지역 지하수 보급	- 취약지역 먹는물 안심이용 중 합대책 단계별 추진 - 취약지역 먹는물 안심이용 공 급 전국 확대	- 기후변화 및 재난·재해 대 비 청정 지하수 보급 및 수질 관리 - 물공급 취약지역 지하수 보 급 및 수질관리
	지표수-지하수 연계 관리	- 하천변 지표수-지하수 연계성 에 기반한 지하수 환경요소 관 리방안 마련 - 지표수-지하수 상호작용을 고려 한 지하수 수질관리 방안 수립 - 물환경정보시스템을 통한 지 표수-지하수 수질 통합관리	- 물공급 안보 확보를 위한 물 배분체계 구축 (지표수-지하 수 배분) - 하천, 호소 등의 기저유출을 고려한 지하수 수질 관리 - 지하수 의존 생태계 보전을 위한 지하수 관리
	재난·재해 대비 지하수 안정성 확보	- 축산단지 등 지하수수질실태 조사 및 오염관리 - 지자체 내 재난·재해 대비 안 전한 지하수 확보를 위한 비상 급수시설의 지하수수질측정망 으로 포함하여 수질 모니터링 추진	- 지진 등 지질재해에 따른 지 하수수질 보전 관리 및 대응 방안 마련

<표 3-67의 계속>

추진부문	추진과제	추진대책	신규추진영역
오염지하수 사후관리 강화	오염지하수 정밀조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전국적인 지하수 오염현황 파악 위한 실태조사 및 DB구축 추진</li> <li>- 오염지역에 대한 지하수 오염 정밀조사 수행 및 후속관리지침 마련</li> <li>- 지하수오염정밀조사 법적 근거 확대</li> <li>- 지하수 수질오염 우선 관리지역 선정</li> </ul>	
	오염지하수 정화사업	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염지하수 확산방지 및 정화 시행을 위한 제도 개선</li> <li>- 오염 지하수관리 전담조직 설립운영</li> <li>- 국가주도의 지하수 정화사업 추진</li> </ul>	- 오염부지 자원정화의 개념으로 지하수-토양-폐기물 등 통합정화사업 추진 체계 마련
	오염지하수 사후관리체계 정립	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수오염 정보시스템 구축 및 오염지도 작성</li> <li>- 오염지하수의 합리적인 사후 조치를 위한 의사결정체계 구축</li> <li>- 지하수 오염원인 규명을 위한 제도 및 절차 마련</li> <li>- 국가 지하수 정화 우선순위 등 후속조치 우선순위 목록 작성</li> </ul>	
수질 관련 산업육성 및 기술개발 촉진	정화산업	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 정화관련 기술 개발 및 보급</li> <li>- 지하수환경관련 전문기관 관리강화</li> </ul>	
	먹는샘물 산업 육성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 먹는샘물 특성화, 다원화 추진</li> <li>- 먹는샘물 청정성 유지강화</li> <li>- 우수 먹는샘물 수출 지원</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 먹는샘물 고부가가치 산업화</li> <li>- 먹는샘물 수질 및 품질관리 확대를 위한 환경영향조사 사후관리 및 품질관리 검증절차 마련</li> </ul>
	기술개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수정화기술 개발</li> <li>- 취약지역 지하수원수 마을상수도 수질 관리·개선 기술개발사업 추진</li> <li>- 지하수오염취약성 평가 기술 개발 및 오염취약성 지표 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지중환경민감성 평가기술 개발 및 지표 개발</li> <li>- 먹는샘물 고부가가치화 기술 개발</li> <li>- 개발도상국 기술지원사업 활성화</li> </ul>

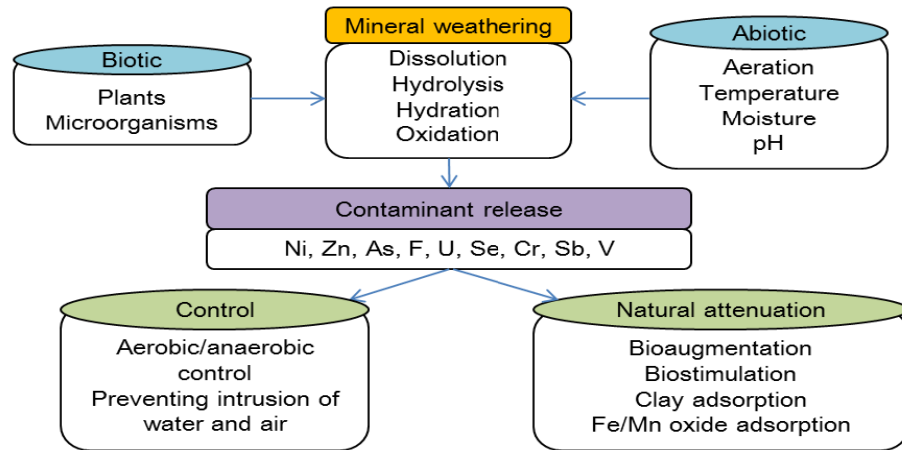
<표 3-67의 계속>

추진부문	추진과제	추진대책	신규추진영역
수질 (및 지하수 의존 생태계) 관리 기반 강화	제도개선	- 지하수 수질보전 및 오염관리에 관한 법제도 강화 - 지하수 담당공무원 전문성 강화를 위한 교육의무화 근거 마련 - 지하수의 개발과 보전을 위한 균형적인 협의체 구성	- 지표수-지하수 연계를 통한 수질 및 지하수 의존 생태계 관리를 위한 법제도 개선 - 오염부지 통합정화를 위한 법제도적 기반 강화
	관리인프라	- 지하수 정보화사업 보완 및 기능강화 - 지역단위지하수관리프로그램 구축 및 개발 - 수질관리 선진화를 위한 재정 기반 강화	- 오염부지 자원통합정화를 위한 전담조직 신설 (가칭 ‘오염자원정화국’) - 해외 물 관련 정책 포럼 및 대화 참여 채널 마련 등 해외 협력 인프라 구축
	교육	- 지하수정화 전문인력 양성을 위한 교육 확대 및 지원 - 지하수 담당공무원의 지하수 수질관련 직무교육 강화 - 대국민 교육 프로그램 신설	
	홍보	- 지하수 가치 제고를 위한 대국민 홍보 추진 및 국민 참여 유도	

## ■ 지하수유역통합관리기술

### ○ 기술개념

- 지표수-지하수 통합 건전한 물순환 형성을 위한 유역 물순환계 재구축과 연계하여 지표수-지하수 통합 물순환계 거동파악기술
- 물순환계와 동반되는 물질순환의 거동파악기술
- 물순환계에 대한 다양한 영향예측, 물순환계 변화를 동반하는 생태계에 대한 영향 연구
- 기존시설 기능을 최대한으로 활용하는 물순환계 건전화 등 저탄소사회 형성을 위한 지표수-지하수 건전한 물순환계 형성에 관한 연구
- 지반침하 억제를 통한 지상 및 지반구조물 손상 방지 및 내구성 증대
  - 지반침하 억제를 통한 지중구조물 파손 방지
  - 지반침하로 인한 지상 구조물 손상 방지
  - 지중구조물 파손으로 인한 2차 피해 발생 억제



<그림 3-92> 자연발생 오염물질의 제어 및 자연저감 처리기법

○ 기술개발내용

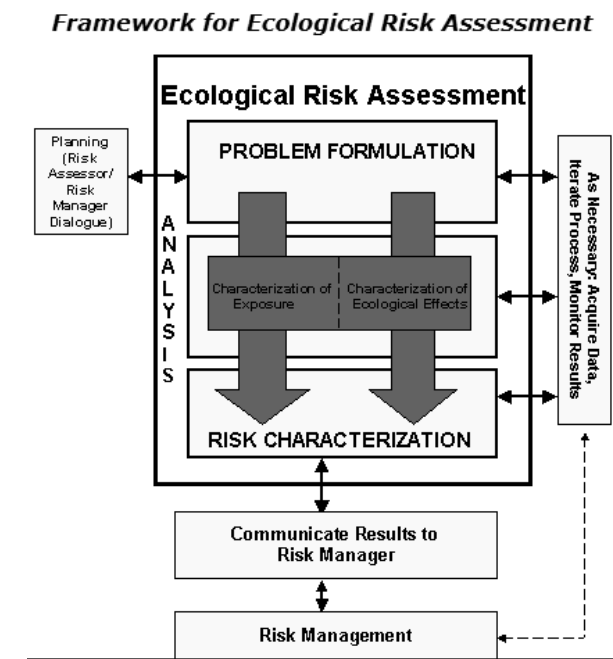
- 지표수-지하수 연계관리란 물관리 목적을 위해 지표수와 지하수의 저장과 이용, 수송시설을 통합하여 운영하는 기술
  - 미개발 조건하에서 많은 하천들은 건기 시 기저유출을 통해 지하수를 공급받으며, 풍수기에는 하천수가 대수층으로 공급하는 기술
  - 수질과 수환경 역시 지표수와 지하수간의 상호작용에 의해 영향을 조사 평가하는 기술
  - 지표수 지하수의 연결성 증진기술
  - 수생태 서식처로서 적정한 수온의 유지 등을 통해 생태관리기술
- 지하수두 변동량 제어를 통한 광역지반침하 제어기법 개발
  - 지하수두 관측장치 및 지하수두 등고선도 작성
  - 지하수 배출지역 식별 기법과 토립자 유실에 따른 지반침하량 산정 기술 개발
  - 지하수위 변동폭을 제어할 수 있는 적절 배수 및 감압시설 개발
- 지하수두 변동에 수반되는 파이핑 발생에 따른 지반침하를 억제하기 위해 지하수두 변동폭을 인위적으로 제어하는 기술임
  - 파이핑 발생 빈도에 따른 토립자 유실량 및 지반침하량 평가방법 개발
  - 토립자 유실을 억제할 수 있는 지하수두 변동량 제어기법 개발
- 자연기원 오염발생 지중환경의 위치특성 및 자연저감 효과에 기반한 최적 관리기법 개발 (누출기작별 최적 제어기술 선정, 대응기술 적용위치 선별, 대응수준 결정 등)

- 개발된 오염물질 제어 및 관리 최적기술의 현장 적용성 평가

## ■ 지중환경위해관리기술

### ○ 기술개념

- 오염부지의 건강성·위해성 진단(인체, 생태)을 위한 위해성평가 체계의 구축 및 활용
- 토양환경관리의 선진화를 위해서 현 위해성평가 지침을 개선하고 확대하여 토양위해성평가 지침의 활용성을 높일 필요성이 있다.
  - 지중환경 통합평가 기술은 오염부지 및 지하공간 활용부지 등 다양한 오염물질 처분 부지를 대상으로 위해성 평가관련 기술을 개발해야하는 영역이다.
- 지중환경 통합평가 기술의 하나로 지중환경 건강성평가 체계의 구축은 향후 건강성평가 지침화 및 향후 정책 활용을 위한 기반연구로 활용성이 높을 것으로 평가된다.
  - 토지 용도별, 매립지, 정화부지, 매몰지, 개량토 등 오염지역별 지중환경 건강성평가 체계 구축은 개별 복잡한 시스템의 오염토를 효과적으로 관리할 수 있는 제도적 기반 연구로서 활용가치가 있다.



자료: 지중환경기술개발기획(환경부, 2016)

<그림 3-93> 미국의 생태위해성평가 기법

○ 기술개발내용

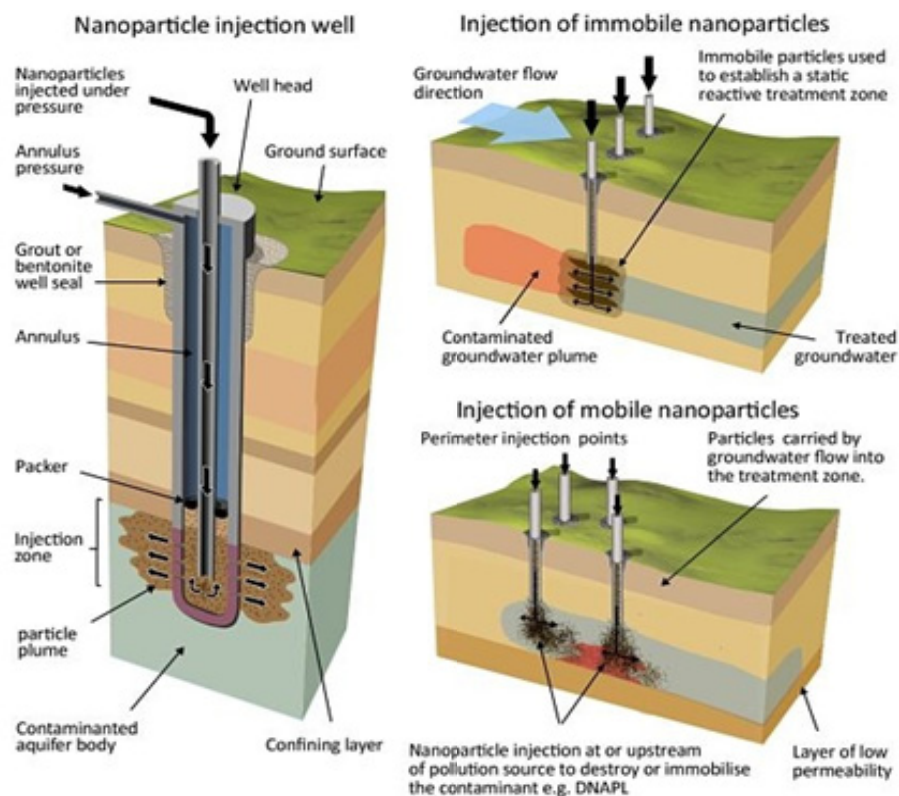
- 토양오염 위해성평가 지침을 활용한 사례연구 : 부지특이적 위해성평가 방안 마련을 포함하여, 노출경로·오염물질 특성·매체 연계성 등을 고려할 수 있는 부지 선정 및 사례연구 수행이 필요하다.
  - 국내외 다양한 활용방안 조사 및 사례연구 결과물을 통한 현 토양 위해성평가 지침의 개선점을 도출해야 한다.
  - 토양오염 위해성평가 지침의 정책적 확대 활용 및 발전 로드맵 제안이 필요하다.
- 지하수 오염취약성평가 기술 개발
- 새로운 생물종별 토양 생태위해성평가 기법 발굴
- 국내형 토양 생태위해성 평가 지침화
- 중금속류, 유류 등 오염물질별 위해성평가 평가 기법 개발
- 폐기물 대상으로 하는 위해성평가 기법 개발
- 지역특이적 토양 인체위해성평가 및 생태위해성평가 기법 개발
  - 앞에서 개발된 생태위해성평가 기반 토양생태기준 설정 체계의 실증 확인을 수행하고 실제 정책과의 연계성을 고려한 적용 타당성 입증하는 기법이다.
- 토양의 다양한 평가지표를 선정하여 평가 지중환경에서 가장 연관성을 보이는 인자를 결정하는 기법을 개발해야 한다.
- 국내 토양 특성을 반영하는 건강성평가지표의 배점화 및 정량화를 위하여, 지중환경 특성을 대표하는 인자값들을 개발하여 표준화방안을 구축한다.
- 지중환경 용도별 (농경지, 개량토의 활용 등) 지중환경 건강성평가 체계 구축
- 매립지, 정화부지, 매몰지, 개량토 등 오염지역별 지중환경 건강성평가 체계 구축
- 한국형 지중환경 건강성평가를 위한 토지이용 용도별 오염지역별 다각적 현장실증 연구를 통한 검증
- 정책적으로 지중환경질을 관리하고 개선하는데 활용될 수 있는 토양 생태 보호를 위한 기준 설정 체계를 개발함으로써 국내 지중환경 영향을 체계적으로 관리할 수 있는 기준 도입에 기여할 것으로 판단된다.
  - 개발된 토양 생태보호를 위한 기준 설정체계를 바탕으로 향후 국내 토양 생태기준이 도입될 경우 국제적 수준의 지중환경 운영관리 체계 수립에 초석이 될 수 있는 연구로 평가

할 수 있다.

## ■ 지하수 정화기술(지중원위치정화기술)

### ○ 기술개념

- 국내 오염 토양-지하수 정화사업이 시작되었던 2000년대 초반, 다양한 원위치 정화기술이 현장에 적용되었으나 정화효율이 높지 않았다.
- 이후 한정된 공기 내 목표정화효율을 달성하기 위해 반출 정화기술의 적용사례가 증가하였다.
- 하지만, 초기 지반조건 교란문제, 부지활용 제한문제 등으로 원위치 정화기술의 적용 필요성은 여전히 높으며, 이를 위해 원위치 정화기술을 고도화하는 기술개발 노력이 필요하다.
- 지중환경 비포화대에 존재하는 오염물질의 용출가능성 및 이동성을 제어하여 오염물질 확산 가능성을 차단하는 기술이다.



자료: 지중환경기술개발기획(환경부, 2016)

<그림 3-94> 나노물질 주입을 통한 지중환경 원위치 정화기술의 예시

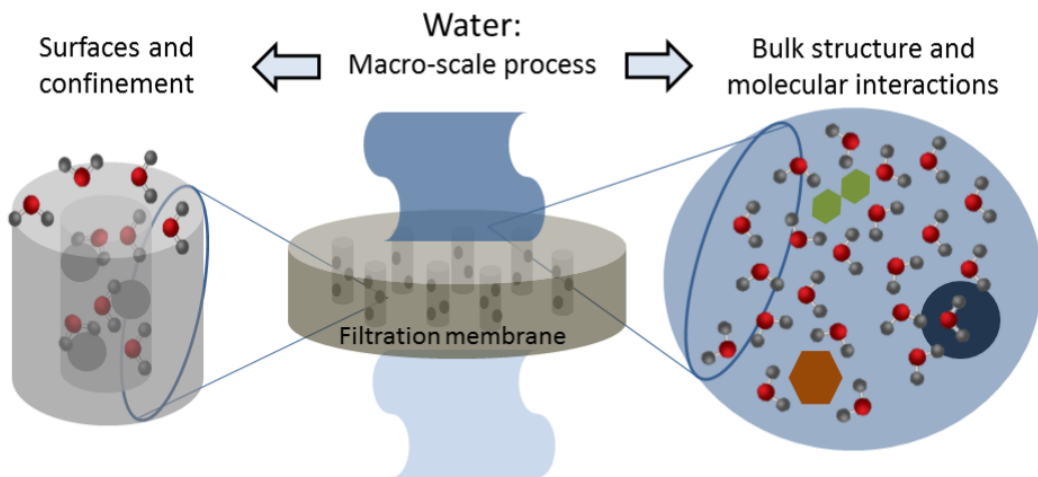
○ 기술개발내용

- 오염물질 지중안정화를 위한 환경친화적 안정화 제재 개발
- 안정화 제재의 원위치 주입기법 개발
- 오염물질과 혼합된 안정화제의 장기거동특성(오염물질 용출여부, 지중생태영향, 지반공학 적 강도특성 변화 등) 평가
- 원위치 정화기술 적용에 따른 환경위해성 평가기술 개발
- 개발된 원위치 정화기술의 현장적용을 통한 정화효율 검증
- 오염이 확인된 지중환경을 현장에서 정화할 수 있는 기술을 개발함으로써 지중공간의 환경 안전성을 확보하고, 오염원을 제거함으로써 주변 지중공간으로의 오염확산 및 생태영향을 차단하여 신중 토양지하수 오염물질에 대한 원위치 제거기술 확보하는 기술개발 영역이다.

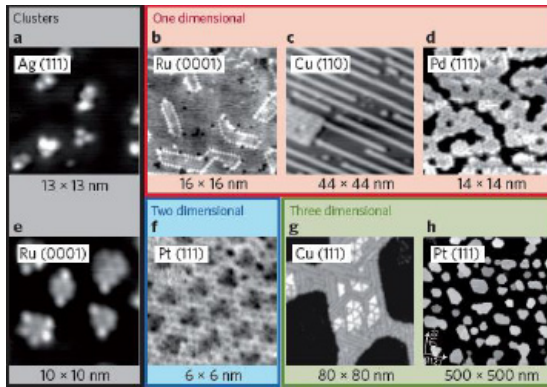
■ 먹는물 고부가가치기술

○ 기술개념

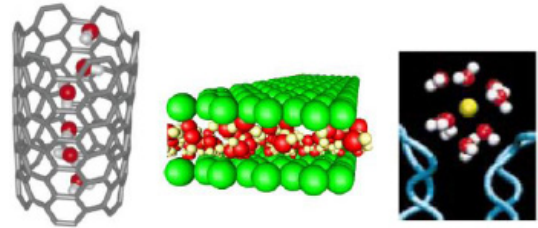
- 좋은물을 식품, 주류, 화장품 등의 원료로 활용하는 기술개발을 통해 관련 산업을 촉진할 수도 있으며, 한국의 좋은물을 브랜드화하는 등 우리나라 좋은물의 부가가치를 높이기 위한 노력도 수반될 필요가 있다.



<그림 3-95> 수처리 기술 개념



<금속표면에서의 물의 다른 형태>



<여러 유형의 물의 기하학적 얽매임>

<그림 3-96> 수처리 기술에 적용되는 물의 기초과학

○ 기술개발내용

- 물의 건강의학적 효능 입증
  - 기능성 물을 포함한 좋은물의 효능에 대한 연구 지원을 통해 물의 항산화 및 항노화 효능 등 건강의학적 효과를 평가
- 좋은물의 산업원료 활용기술 개발
  - 물의 분자화학적 특성 등에 대한 기초연구를 지원하고, 주류, 장류, 화장품 등에 대한 좋은물 효능 검증 및 산업별 최적 제조기술 개발
  - 물의 나노 및 분자 규모 특성에 대한 분석은 좋은물 산업원료 활용기술 및 수처리 등에 활용될 수 있는 기초기반기술로, 단기간 내 세계 최고수준의 기술력 확보가 가능한 분야
- 먹는물 수원지 평가 및 신규 수원지 발굴
  - 개발된 좋은물의 가이드라인을 적용하여 기존의 개발 수원지, 약수, 온천수 등에 대한 평가 및 미개발된 우리 땅의 좋은물 수원지의 발굴
  - 유럽, 미국 등에서 생수로 널리 이용되는 미네랄수 신규 수원지 발굴 및 개발을 통해 국민에게 건강한 물의 공급 및 해외 시장 진출 확대
- 한국의 좋은물 브랜드화
  - 용기 디자인 개선, 스토리 개발 등의 전략을 통해 ‘에비앙, 피지워터 등’ 와 같은 세계적인 물 브랜드를 육성하고, 수원지별로 물을 활용한 지역 관광상품 등을 개발

### (3) 토양지하수 로드맵

#### (가) 토양환경정적책 추진로드맵

단계목표	단기 (2018~2020) (3년)	중기 (2021~2023) (23년)	장기 (2024~2025) (2년)
토양질 통합관리 체계확립	토양생태서비스 실천기반 조성	생태기능 정책 실천역량 보강	지속가능한 토양환경관리를 위한 생태 통합 관리 지원시스템 구축

추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표
적응	<b>Nexus Approach 연구</b>								
	토양-대기-물(지표수, 지하수)-식량-폐기물-에너지-토지이용-기후 변화의 Nexus Approach 방안		토양의 건강성 훼손 현황 조사 및 평가, 정책 방안						
저감	<b>기후변화가 우리나라 토양에 미치는 영향을 감소시킬 수 있는 정책 수단과 방법</b>								
	기후변화와 토양의 유기물질(유기 탄소와 질소) 보전 및 함양방안, 기술 개발								
	기후변화와 토양수분 함량 변화 예측 및 적응 방안, 기술 개발								
	기후변화와 토양의 산성화/염화 예측 및 적응 방안, 기술 개발								
기후변화와 토양의 침식(유실) 예측 및 적응 방안, 기술 개발									
기후변화와 토양의 다짐과 차폐 변화 예측 및 적응 방안, 기술 개발									
토양건강성 확보방안 발굴									
기후변화적응 기반 토양역할 강화									



추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표
<b>회복</b>	<p>→</p> <p>토양생태계의 건강성 평가 방법 개발</p> <p>→</p> <p>토양훼손 요인(토양오염, 차폐, 다짐, 산성화, 염화방지, 유기물질 감소, 사막화 등)이 토양생태계에 미치는 영향 평가 방법 개발</p> <p>→</p> <p>토양오염 회복 기술 개발</p> <p>토양차폐 회복 기술 개발</p> <p>토양다짐 회복 기술 개발</p> <p>토양산성화·염화 회복 기술 개발</p> <p>토양유기물질의 토양 회복 기술 개발</p> <p>토양사막화 회복 기술 개발</p> <p>토지이용변화(정주지역 개발, 도로, 기반시설, 농지개발 등)가 토양생태계에 미치는 영향 평가</p>	<p>토양생태계의 기능 평가 방법(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계의 서비스 평가 방법 개발 및 산정</p>	<p>토양생태계의 보전 및 지속가능한 이용 정책 이용 수단 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 체계 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양의 사막화 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양의 사막화 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계의 서비스 평가 방법 개발 및 산정</p>	<p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양의 사막화 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양의 사막화 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계의 서비스 평가 방법 개발 및 산정</p>	<p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양의 사막화 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성 평가 방법 및 모니터링 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양생태계서비스 평가 및 지속가능한 이용 기술 개발</p> <p>→</p> <p>토양의 사막화 평가 및 적용 정책 개발(법, 제도)</p> <p>→</p> <p>토양생태계의 서비스 평가 방법 개발 및 산정</p>	<p>토양생태계 서비스 이용까지 향상</p>			

추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표
회피	<b>토양유기물질</b>								
	국내 토양에서의 토양유기물질 현황 조사 (전국 및 지역 단위에서 접근)								
	토양의 유기물질 보전 및 지속가능한 이용 대책 개발 (법, 제도)	↓							
	↙	환경성 평가 및 환경영향평가 적용 방안 (법, 제도)							
	<b>토양의 차폐 및 다짐</b>								
	토양의 차폐 및 다짐 현황 조사 및 평가 (전국 및 지역 단위에서 접근)								
	토양의 차폐·다짐, 토양의 물함량과 산사태 연관 관계 조사 및 평가 (전국 및 지역 단위에서 접근)	↓							
	토양다짐의 평가 및 적용 정책 개발 (법, 제도)	↘	토양차폐 평가 및 적용 정책 개발 (법, 제도)						
		토양차폐 회피(방지) 기술 개발							
	<b>토양 산성화·염화</b>								
토양 산성화·염화 조사 및 평가 (전국 및 지역 단위에서 접근)									
토양 산성화·염화 방지를 위한 지속가능한 정책 개발 (법, 제도)	↓								
토양 산성화·염화 방지를 위한 지속가능한 기술 개발									

추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표								
적응		국제협력	UN SDG/CBD 등의 국제협약에 대한 대응 전략 개발						토양환경질 향상 협력								
										국제협력	국제협력	국제협력	국제협력	국제협력	국제협력	국제협력	국제협력
정부의 책임과 역할, 거버넌스 체계 구축 방안	자료의 정보화 사업 (DB 구축, CH 마련 등) 구축 및 운영	민간협력 체계 구축 및 운영	공공 및 민간 홍보 체계 구축 및 운영						토양환경 신거버넌스 구축								

(나) 지하수환경정정책 로드맵

단계	단기 (2018~2020) (3년)	중기 (2021~2023) (23년)	장기 (2024~2025) (2년)
지속가능한 지하수의 친환경이용 및 환경보전	지하수 생태서비스 실천기반 조성	생태기능 정책 실천역량 보강	지속가능한 지하수 환경관리를 위한 생태 통합 관리 지원시스템 구축

추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표
적응	<b>사전예방적 지하수수질 및 지하수 의존 생태계 보전·관리</b>								
	지하수수질관리를 위한 환경기준 설정 및 수질목표 설정·관리제 도입		도시지역 오염원 및 위해요소 발굴 및 관리방안 마련		지표수-지하수 연계 수질측정망 구축 및 운영		지중환경민감성을 고려한 지하수 개발이용 사업 및 시설 관리		사전예방적 정책강화
저감	<b>지하수 이용 가치 제고를 위한 정책 선진화</b>								
	기후변화 및 재난·재해 대비 청정 지하수 보급 및 수질관리	물공급 취약지역 지하수 보급 및 수질관리							

추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표
	물공급 안보 확보를 위한 물 배분체계 구축 (지표수-지하수 배분)		↓						
		↑	하천, 호소 등의 기저유출을 수질 관리						
		↑		지하수 의존 생태계 보전을 위한 지하수 관리					
				지진 등 지질재해에 따른 지하수수질 보전 관리 및 대응 방안 마련					
<b>회복</b>	<b>오염지하수 사후관리 강화</b>								
	오염부지 자원정화의 개념으로 지하수-토양-폐기물 등 통합정화사업 추진 체계 마련								
<b>회피</b>	<b>수질 관련 산업육성 및 기술개발 촉진</b>								
	먹는샘물 고부가가치 산업화								
	먹는샘물 수질 및 품질 관리 확대를 위한 환경영향조사 사후관리 및 품질관리 검증절차 마련		먹는샘물 고부가가치화 개발		기술 개발		개발도상국 기술지원사업 활성화		먹는샘물 고부가가치 향상
	지중환경민감성 평가기술 개발 및 지표 개발								

추진전략	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	목표
	<p><b>수질 ( 및 지하수 의존 생태계) 관리 기반 강화</b></p> <p>오염부지 자원통합 정화 전담조직 신설</p> <p>해외 물 관련 정책 포럼 및 대화 참여 채널 마련 등 해외 협력 인프라 구축</p>								지하수수질관리 인프라확보

## (다) 신패러다임 정책의 추진시사점

### ① 토양환경정책

- 토양오염조사 및 정화영역에서 토양질 향상을 위한 환경영역으로 확장
  - 기존 산업단지, 매립지, 폐광산 등 → 비오염 손상 토양환경
  - 토양생태계, 통합환경관리, 토양지하수 기능 생태계 서비스 가치 활용·향상
  - 환경매체 중 토양매체의 사후관리 특성을 고려한 사전예방정책강화
  - (기존) 화학적 환경유해인자(표토일부 물리적 유해인자) → (확대) 생물학적 및 물리적 환경 유해인자 관리

### ② 지하수환경정책

- 지하수의 신패러다임 정책에 기반한 기술과 산업을 지하수를 위협하는 요인에 대한 새로운 정책방향은 지하수 수생태의 가치를 향상시키는 지하수 보전과 물순환 환경정책
  - 지하수를 위협 또는 지하수질에 영향을 주는 주요 요인의 결과로 나타나는 현상(State)은 i) 기후변화(가뭄 등), ii) 지하수 이용시설관리, iii) 축정망, iv) 지하수 오염원, v) 이산화탄소 지중저장 환경관리, vi) 지열, vii) 먹는 샘물, viii) 법과 제도의 운영, ix) 토양-지하수 상호작용 등으로 연결된다.
  - 지하수를 위협 또는 지하수질에 영향을 주는 주요 요인의 결과에 대응하는 지하수환경보전 정책(Response)으로 지하수의존 생태계 보전, 지중환경위해관리, 지하수 정화기술 고도화, 친환경 지하수자원 이용, 먹는물 고부가가치화를 추진하여 지속가능한 지하수의 친환경이용 및 환경보전을 달성하는 것이다.

### 3-3. 연구개발 결과 요약

- 우리나라의 토양환경정책은 유해화학물질에 기반한 환경유해인자의 오염조사와 정화사업에 치중되어 있어 토양환경의 생태계 보전 및 관리에 부합하지 못하고 있다.
  - 「토양환경보전법」 제1조(목적)에는 이 법은 “토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고, 토양생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 한다.”고 명시되어 있으나, 현행법률 및 제도상에는 토양생태계의 보전 대상, 수단과 방법 등이 제시되어 있지 않는 등 토양 본래의 기능을 유지하기 위한 토양생태계 보전에 관련된 국가의 체계적인 정책은 시행되고 있지 않다.
  - 오염부지의 토양에서 오염물질만을 제거 또는 감소시켜 오염부지의 토양정화를 완료한 것으로 판단하고 있다. 이로 인해 토양의 기능 향상, 생태적 가치 부여 및 보전 등 법에서 정한 기본 목적에도 부합되지 않는다.
- 우리나라의 지하수는 별도의 수처리 없이 언제 어디서나 쉽게 사용할 수 있고, 사용하고 자 할 때 개발이 용이하며, 수량도 비교적 풍부하여 사용자가 주변 환경 및 사용량에 대해 조금만 주의를 기울이면 장기간 편리하게 사용이 가능하기 때문에, 전 세계적으로 추진하고 있는 ‘지속가능한 발전’의 개념에 잘 들어맞는 유형의 환경 및 자원이나 현행 「지하수법」만으로는 지하수의 오염방지와 수질관리의 목적을 이루는 데에 한계가 있다 (이정호, 2007).
  - 토양과 지하수오염과 타매체와의 연계성을 고려하여 지하수의 보전과 관리 및 연계 방안 모색이 있어야 한다.
    - 1993년 제정된 지하수법은 국내 지하수 수자원 관리 및 계획, 정책 수립의 근간이 되는 모범으로 주로 지하수 수자원의 수량관리 및 개발 및 이용에 관련된 제도 정립에 초점을 두고 있으며, 수도법에 근거한 음용수 수질기준이 지하수법 제정 이전까지 지하수에 일괄적으로 적용되었으나 지하수법 제정 이후에는 지하수법에 근거하여 일반오염물질 5항목, 특정 유해물질 10항목을 포함한 지하수 수질기준이 1994년에 만들어진 것이다.
- 우리나라의 지하수 환경관리는 현안문제를 중심으로 수질환경관리가 이루어지며, 지하수의 이용에 따른 친환경적 지속가능한 관리가 꾸준히 요구되는 이슈를 포함하고 있으며, 인프라 강화를 통한 지하수관리로서 실효성 있는 법·제도 개선 등 다음 지하수 관리와 이용부담금 지역관리 계획 정착지원 등이 요구되고 있다.
  - 기후변화가뭇 대응 지하수 확보 및 지원체계구축과 유출 지하수 활용 및 인공함양을 통한

지속가능한 지하수 확보로 지하수의 활용가치 극대화가 필요하다.

- 지하수 보전구역 활성화 및 함양지역보호 등 지속가능한 관리와 먹는샘물 및 온천수 수량·수질관리강화로 지하수의 미래가치 확보를 위한 보전·관리가 이루어져야 한다.
- 지하수의 지속적 조사, 관측, 연구 통합으로 전국적 기초조사 및 보완조사 실시로 국가지하수 기초정보 인프라 구축하고, 지반침하 지진 등 특수목적 관측망 설치 및 관측망 통합관리를 통해 지하수 정보 표준화 및 통합관리 기반을 구축해야 한다.
- EU(유럽연합)의 선진국과 미국에서는 토양생태계를 이해하기 위해서, 이를 구성하고 있는 토양생물의 다양성에 대한 이해는 필수임을 인식하고 토양생물다양성의 보전과 지속가능한 이용을 정책목표로 하여 접근하고 있다.
  - 현시대에서 세계적인 현상은 토양의 기능 저하이며(Lal, 2010), 이러한 현상은 토양침식을 포함한 훼손 증가, 이탄층의 붕괴, 생산성 감소, 산성화·염화 증가, 답압·차폐 증가, 토양의 CO<sub>2</sub>와 메탄의 방출 증가 등이다 (Lal, 2004).
- 우리나라에서 「토양환경보전법」에서 토양생태계의 관리 및 보전을 다루고 있지 못하고 있음은 이에 관한 과학적인 지식과 정보, 그리고 이행 수단과 방법이 부족하기 때문이다. 「토양환경보전법」에 토양생태계를 관리 및 보전하기 위한 토양생태계의 보전대상과 범위, 수단과 방법에 대한 구체적인 정책 접근의 틀이 마련되어야 한다.
- 우리나라에서 토양생태계를 보전하고 관리하기 위한 정책이 수립되고 이행되기 위해서는 토양을 구성하고 있는 토양의 생태계에 대한 이해는 필수이며(Wolters, 2001), 토양생태계의 서비스를 제공하고 있는 토양생물다양성의 구성과 기능 등을 이해하는 것이 필요하다.
- 토양·지하수의 기능과 생태계서비스, OECD 국가에서 수행하고 있는 토양·지하수 환경정책의 조사 분석을 통해 향후 우리나라가 선진국형 토양·지하수 환경정책으로 전환될 수 있는 새로운 정책 패러다임을 발굴하였고, 이를 통해 미래의 토양·지하수 환경기술 산업 및 전망을 토대로 하여 중장기 핵심이슈를 제시하고 로드맵을 수립하였으며, OECD 선진국 토양·지하수환경정책 패러다임 발굴, 제시 및 사례연구, 국내 토양·지하수환경정책 성과분석·미래전망, 국내 토양·지하수환경 산업인프라를 분석하였다.
- 미국과 유럽 등 선진외국에서 토양·지하수 오염과 오염부지의 처리는 1980년대부터 본격적으로 시행되었으며, 토양·지하수의 기능과 다양한 생태계서비스에 관련된 개념은 1990년대 초부터 나타나기 시작하면서 이들 선진국들의 토양, 토양과 연계된 지하수의 보전 및 관리 정책은 토양의 기능과 생태계 서비스를 보전하고 관리하는 정책으로 수립되고 이행되어야 한다.

- 2000년대 들어 나타나기 시작한 넥서스 접근(Nexus approach)과 2014년 UN에서 채택한 지속가능 개발 목표(SDG, Sustainable Development Goals)에는 토양과 다른 환경자원과의 연결, 생태계서비스와 사회적인 고려, 건강한 토양은 식량의 안보에 주요한 역할하고 있음이 강조되었으며, 특히 토양의 생태계서비스를 보전하기 위하여 SDG 19개 목표에서 토양의 보전을 직, 간접적으로 연계하여 제시하고 있다.
- Lal et al.(2015)에서 제시하고 있는 토양의 넥서스 접근(Nexus approach)과 UN SDG는 기후 변화에 의한 토양의 질 관리, 토양의 침식 방지 및 저감, 지속가능한 현대 에너지이용, 토양에서의 바이오매스의 역할과 에너지 수요, 기후변화를 완화하기 위한 탄소의 포획 이슈 등 많은 부문에서 내용을 공유하고 있다.
- 기후변화와 토양·지하수 자원의 오남용은 토양의 오염, 침식, 차폐, 답압, 산성화·염화 등을 통해 토양·지하수가 훼손되고 있는 토양·지하수의 기능과 생태계서비스를 보전하고 관리하기 위해서는 토양·지하수의 기능, 생태계서비스는 지구 차원에서 위협받고 있으며, 인류의 지속가능한 개발을 위해 토양·지하수는 반드시 보전해야 할 가장 중요한 핵심 매체를 고려할 때, 토양·지하수에 현재와 미래는 인류의 생존을 결정하는 안보 개념이 도입되어야 하며(EU, 2015; Koch et al., 2013; Ledbetter, 2015; McBratney et al., 2014), 이는 UN의 SDG에서 제시하고 있는 “각 회원국에 토양·지하수의 기능과 생태계서비스를 보전하는 것이 인류의 지속가능한 개발과 더불어 인류의 미래가 달려 있음” 과 같은 맥락이다.
- 그동안 우리나라의 토양·지하수환경보전 정책은 국민건강중심, 사전예방체계 구축, 합리적인 토양관리제도의 정착 및 이행, 토양·지하수의 연계관리, 토양·지하수 기술 선진화, 토양·지하수환경산업의 육성 및 국제협력에 초점을 두고 진행해 온 토양·지하수 오염방지 및 예방에 초점을 두고 진행해 온 정책으로, 토양·지하수의 다양한 기능과 생태계서비스의 지속가능한 이용 측면을 고려하지 못하고 있다.
- 우리나라의 토양환경보전법 제1조(목적)에 명시하고 있는 토양환경보전의 목적인 “토양생태계의 보전” 을 이행하기 위한 정책이 이루어지고 있다고 보기 어려우며, 현행법률 및 제도상에는 토양생태계의 보전 대상, 수단과 방법 등이 제시되어 있지 않다.
- 최근 환경부는 토양생태계의 환경적 기능을 유지하기 위한 ‘표토보전 5개년 종합계획’ 을 수립하였으며, 표토의 대량손실을 유발할 수 있는 골프장, 산업단지 등의 인위적인 침식에 따른 표토유실을 방지하기 위하여 표토환경영향평가를 2016년부터 시행하기로 계획되어 있는 등, 최근 토양 생태계 서비스 기능을 보전하고 지속가능한 토양환경의 이용 정책이 제시되고 있는 등 토양의 생태계서비스 보전 및 지속가능한 이용에 대한 실마리가 나타나

고 있으나, 아직까지 토양 본래의 기능을 유지하기 위한 토양생태계 보전에 관련된 국가의 체계적인 정책은 시행되고 있지 않다.

- 더불어 그간 우리나라에서 주력해 온 토양·지하수 오염방지 및 예방 기술 개발 사업은 토양정화업 등록제도(2005), 누출검사 의무화(2006)로 급격하게 성장하였으나, 2011년을 정점으로 토양정화 업체수 감소 추세에 있어 토양·지하수환경의 생태관리에 부합하는 기술개발과 산업발전이 필요하다.
- 우리나라 토양·지하수환경에 위해 또는 위협하는 토양·지하수환경 요소를 관련 정책부문과 연계하여 토양보전정책의 목표를 수립할 수 있으며, 우리의 정책은 이를 달성하기 위한 정책의 목적과 목표를 수립하여 이행되어야 할 것이다.
  - 기존의 우리나라 정책은 토양·지하수환경에서의 생산성과 기능 이용의 측면에서, 토양·지하수환경을 훼손하는 주요 위협요인인 오염과 침식 등으로부터의 토양·지하수환경 관리에 초점을 두고 있었으나, 토양·지하수의 기능과 생태계서비스를 보전하여 건강하고 지속가능한 개발로 연계되어야 한다.
  - 우리의 정책은 토양·지하수환경을 훼손하는 요인으로부터의 토양·지하수질을 회복하고 건강한 토양·지하수환경의 질을 유지하기 위한 목적으로 하여 토양·지하수환경 보전과 지속가능한 이용을 위한 구체적인 목표를 두고 법과 제도를 구축하고 이행되어야 할 것이다.
  - 또한 이들 목표를 달성하기 위한 토양·지하수 부문의 기술과 산업을 개발하고 지원해야 한다.
- 토양·지하수환경 정책은 토양·지하수 환경 관리의 영역확대를 위한 정책개발, 새로운 분야 기술, 정책 기반마련, 토양·지하수 관리정책 집행 실효성 확보 차원에서 정책방향 설정하고 토양·지하수환경 관리의 영역확대를 위한 정책개발을 제시하였다.
  - 토양·지하수에 미치는 압력, 특히 다른 매체와의 인과 관계에 의해 도출되는 압력을 줄이는 방향에서 토양·지하수정책의 접근(Nexus approach)을 제시하였고, 실효성 확보할 수 있는 토양·지하수환경관련 기술에 대한 정의 및 범위, 분류체계를 도출하여 토양·지하수환경기술 및 산업을 제시하였다.
- 토양·지하수 환경의 보전 및 지속가능한 이용을 위한 주요 전략으로 국가안보 차원에서 i) 인간과 생태계 위해 요인의 저감, ii) 기후와 토양·지하수 환경 변화에 대한 적응력 제고, iii) 인간의 건강과 복지, 토양생태계에 미칠 수 있는 잠재적인 환경 위해에 대한 회피, iv) 토양생태계와 자원과 지속가능한 경제 발전 및 사회적 불평등 해소에 기여하는 사회적 복원력을 회복하는 것이다.

- 국내 토양·지하수 산업체들의 해외시장 진출을 위한 시도가 확대될 전망이나, 해외진출에 대한 경험·역량이 부족한 토양·지하수 산업체들을 위한 효과적인 지원방안을 마련하기 위한 기술개발과 산업영역을 발굴하는 사업을 중장기로 구분하여 기술·산업지원 로드맵을 구축하였다.

## 4. 목표달성도 및 관련분야 기여도

### 4-1. 목표달성도

- 본 연구는 2년간 1) 토양·지하수 환경정책 패러다임 발굴, 2) 토양·지하수 환경정책분석 및 미래전망 분석, 3) 토양·지하수 환경 기술 산업 수요 및 전망분석, 4) 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책사업 로드맵 개발을 주요 목표로 하고 있다.
- 상기 연구개발목표에 부합하도록, 1) 주요국 정책방향 대비 추진 패러다임을 발굴하였으며, 2) 기존 토양 및 지하수환경보전계획 정책 이행 성과를 분석하고, 3) 토양·지하수환경 산업 인프라 조사 및 시사점을 도출하였으며, 4) 새로운 토양·지하수환경정책 패러다임 대비 정책계획을 수립하고, 5) 미래수요 예측 결과를 도출하였으며, 이를 반영한 정부정책의 제안을 위한 기획보고서 도출 2건을 각각 100% 달성하였다.

연차	구분	성과목표	성과지표	목표치 (A)	가중치 (%) (B)	실적치 (C)	목표달성도 (D=C/A)	지표 점수 (D×B)
	계				100			100
1차년도	사회적 성과	기획보고서 도출	정책 채택 및 제안	1건	100	100	1	100
2차년도	사회적 성과	기획보고서 도출	정책 채택 및 제안	1건	100	100	1	100

## 4-2. 관련분야 기여도

- 기존에 우리나라에서 접근한 토양 및 지하수 정책 및 환경 및 기술 산업개발 등은 토양·지하수의 모니터링, 토양·지하수 오염방지 및 오염된 토양·지하수의 처리 및 관리 부문에 치우쳐 있었으나, 유럽 등의 선진 OECD 국가에서는 토양·지하수의 생태계와 생태계서비스를 고려한 정책 및 기술 산업으로 접근하고 있으며,
- 본 연구에서 개발하는 OECD 선진국 토양·지하수 환경정책 성과 분석과 미래전망, 이를 기반으로 하는 우리나라가 지향해야 할 토양·지하수 환경정책의 패러다임 발굴은 이전의 우리나라 토양·지하수 환경정책과 기술개발 부문에서 시도된 바 없으며, 본 연구과제에서는 이를 토대로 토양·지하수 환경정책 중장기 핵심이슈 및 정책 로드맵을 수립하고, 토양·지하수 환경 기술·산업 수요 및 전망분석을 포함하고 있다.
- 따라서 본 연구에서 제시하는 토양·지하수 환경정책과 기술·산업 부문의 연구결과와 제안은 OECD 선진국의 관련정책의 흐름을 반영하고, 국내의 취지에 맞는 정책 및 기술 개발을 가능하게 하며, 1) 관련기관의 정책 수립에 기여하고, 2) 관련 기술 및 산업의 육성에 기여할 수 있다.
  - (정책 수립에 기여) 본 과제의 연구결과는 토양·지하수 분야의 중장기계획 수립 시 혹은 기존 계획의 추진전략을 보완하고, 새로운 토양·지하수 분야 중장기계획의 추진 전략에 미래 유망 연구 분야의 발굴(사전예방 등 통합적 정책 강화 위한 자료 마련) 및 개발에 활용 가능하며, 최종적으로 환경부 등 유관기관의 토양·지하수 정책 수립에 기여할 수 있다.
  - (기술적, 환경적, 경제적, 산업적 측면의 성과에 기여) 토양·지하수 분야의 정책 사업에 따른 공공기술개발영역 설정이 가능하고, 국민편익향상을 위한 공공정책 영역 확대가 가능하며, 토양·지하수산업 육성을 위한 기반을 마련하고 현행 시장의 한계를 극복하기 위한 새로운 영역을 발굴하는데 기여할 수 있다. 또한, 선진국형 정책사업 개발을 통한 공공일자리 및 토양·지하수환경산업 일자리 창출에도 기여할 수 있다.

## 5. 연구결과의 활용계획

- 토양·지하수 분야 정책 및 실무 담당, 기술개발자들의 교육 및 홍보 자료로 활용
- 토양·지하수 분야 중장기계획 추진전략을 보완하고, 미래 연구 및 기술개발 분야 발굴(사전예방 등 통합적 정책 강화를 위한 자료 마련)에 활용

## 6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

- EC/JRC(Joint Research Centre). 2015. European Soil Portal-Soil Data and Information Systems.  
  
[http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/pesera/pesera\\_download.html](http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/pesera/pesera_download.html).
- EC/JRC European Soil Data Centre. 2011-2012. European Environment Information and Observation Network (EIO-NET). EEA and JRC Press.
- ICSU, ISSC (International Council for Science, International Social Science Council) 2015. Review of the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. Paris: International Council for Science (ICSU).
- Kurian, M and Ardakanian, R. (eds) 2015. Governing the Nexus Water, Soil and Waste Resources Considering Global Change. United Nations University (UNU-FLORES) Dresden, Germany. 230p.
- McBratney, A., Field, D., and Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 213:203-213.
- Montanarella, L. and Alva, I. L. 2015. Putting soils on the agenda: the three Rio Conventions and the post-2015 development agenda. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2015, 15:41-48.
- AFES(L'Association Française pour l'Étude du Sol), INRA(Institut national de la recherche agronomique), and INERIS(L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), 2016, The 2nd Global Soil Security Conference. Paris, 2016: Abstract and documents related to oral presentations and posters.

## **7. 연구개발결과의 보안등급**

- 일반등급

## **8. 국가과학기술종합정보시스템(NTIS)에 등록된 연구시설·장비 현황**

- 해당사항 없음

## **9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적**

- 해당사항 없음

## **10. 연구개발과제의 대표적 연구실적**

- 해당사항 없음

## **11. 기타사항**

- 해당사항 없음

## 12. 참고문헌

[국내문헌]

- 강형식, 현윤정, 전상묵. 2015. 지하수 의존도에 따른 수생태계 관리를 위한 기저유출지표 개발 및 활용방안 연구. 한국환경정책·평가연구원.
- 고동찬. 2016. OECD 주요국 지하수 정책 현황 - 미국. 한국환경정책평가연구원. 원고
- 곽한강, 하상건, 허승오, 정강호. 2005. 비점오염 관리와 국토 보전을 위한 전국 토양 침식 위험성 평가. 농촌진흥청.
- 국립기상연구소. 2009. 기후변화 이해하기.
- 국회입법조사처. 2011.1.7. 살처분 가축 매몰지역 관리 현황과 개선과제.
- 김경호 등. 2009. 지구온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승과 제주도 동부 지역 지하수의 염수대변화. 한국지하수토양환경학회지 14(3):68-79.
- 김규범. 2016. OECD 주요국 지하수 정책 현황 - 영국, 네덜란드. 한국환경정책·평가연구원. 원고
- 김지영, 오윤근, 류성필. 2001. 제주도동부지역 지하수의 염수화에 관한 연구. 한국환경과학회지 10(1):47-58.
- 김주훈, 김경탁, 이진원. 2011. 클라우드 및 HYGIS 기반 토양 유실 분석 시스템 개발. 한국지리정보학회지 14(4):63-76.
- 김용철. 2016. OECD 주요국 지하수 정책 현황 - 미국. 한국환경정책·평가연구원. 원고
- 김원영. 2014. 지하수 추출에 의한 지반침하: 중국의 예. 한국지구물리·물리탐사학회 2014년 추계연합학술대회 자료집. pp. 227-228
- 국립환경과학원. 2012. 표토 침식 조사 및 보전 종합대책 마련 연구
- 국토해양부. 2011. 2011년 국토의 계획 및 이용에 관한 연차보고서.
- 국토해양부. 2012. 지하수관리기본계획(2012~2021).
- 문현주. 2010. 지하수자원의 합리적 이용 관리를 위한 비용분담체계 및 지하수재정 운영방안 연구. 한국환경정책·평가연구원. 정책보고서 2010-04.
- 박용하, 윤서성, 방상원, 김미정, 양재의, 이양희. 2002. 토양오염지역의 관리 및 복원방안 I. 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 RE-07.
- 박용하, 윤서성, 송재우, 장지수, 이양희. 2003. 토양오염지역의 관리 및 복원방안 II. 한국환경정책·평가연구원. 연구보고서 RE-13.
- 박용하, 최현아. 2012. 토양생태계의 지속성 관리를 위한 토양환경보전정책 방향. 한국환경정책·평가연구원 정책보고 2012-10.
- 박용하, 노태호, 이현우, 오일찬, 이승준, 장훈, 강이현, 정민곤, 배미레. 2014. 제12차 생물다양

- 성협약 당사국총회 개최 및 국제협상을 위한 대응전략 수립 연구(1차). 환경부.
- 박종원. 2016. 미국과 EU의 청정 지하저수지 관련 법제의 현황과 법정책적 시사점, 법과정책 연구 v.16, no.1, pp. 95-123.
- 삼림종합연구소. 2001. 침엽활엽수림에 있어 수풀 바닥면 이산화탄소 방출량의 장기연속측정-카와고에 삼림기상시험지.
- 송윤호. 2012. 「지열에너지자원, 기술동향, 활용현황, 전망 및 과제」. 한국환경정책·평가연구원 세미나 발표자료.
- 오윤근, 김경훈, 류성필. 2000. 제주도 동부지역의 지하수 염수화에 대한 이화학적 특성. 한국 환경과학회지 9(3):253-259.
- 윤태국, 2016. 한국환경정책·평가연구원 내부 세미나 발표자료 "싱크홀 관련 건설 현장 안전 교육"
- 이수재 등. 2005. 지하수 수질관리 및 오염정화기준 합리적 개선방안 연구. 한국환경정책·평가연구원.
- 이수재 등. 2007. 지하수자원의 합리적 이용·관리를 위한 정책방향. 한국환경정책·평가연구원.
- 이수재 외. 2015. 지하수 수질의 과학적 관리방안 마련. 환경부.
- 이정호 등. 2007. 지하수 수질기준 개선을 위한 선행 방안 연구. 환경부.
- 이진용. 2016. OECD 주요국 지하수 정책 현황 - 독일. 한국환경정책·평가연구원. 원고
- 정영상. 2015. 토양 침식과 보전 기술 및 정책 동향. 전문가 원고.
- (주)더비엔아이. 2010. 토양지하수 오염방지기술개발의 상용화를 위한 지원시스템개발.
- 토양환경센터. GAIA 표토자원전략연구단. 2015. 표토자원연구단 2015 국제심포지엄 표토자원전략연구단. 2017. <http://pyoto.araon.org/>(표토정보포털)
- 한국산업기술평가원. 2013. 자립형 센서기반 지능형환경관리시스템 구축전략기획.
- 한국수자원공사. 2014. 「2013 지하수조사연보」
- 한국환경공단. 2014. 지하수오염 관리 및 정화기술.
- 한국환경산업기술원. 2012. 토양지하수오염방지기술개발사업 2단계 기획.
- 한국환경산업기술원. 2013. 중국 토양지하수환경시장 진출을 위한 한 대만 협력전략수립 및 협력사업 모델링.
- 한국환경산업기술원. 2014. 토양지하수환경산업육성계획.
- 한국환경산업기술원. 2015. 토양지하수오염방지기술개발사업 3단계 기획.
- 한국환경산업기술원. 2015. 지중환경관리기술개발사업 사업기획.
- 한국환경산업기술원. 2016. 토양지하수환경통계.
- 한양대학교 산학협력단. 2008.12. 토양지하수분야 중대형 기술개발과제 추진계획 수립을 위한 기획연구.

한양대학교. 2009. 토양환경보전법 책임체계의 새로운 방향: 브라운필드(Brownfields)문제.  
 한정상, 한찬. 2015. 「지하수관리와 응용」, p.177  
 환경보전협회. 2014. 토양·지하수정화기술의현황 및 향후기술개발정책방향  
 환경부. 2001. 표토보전 및 침식방지 대책에 관한 연구. 한국지반환경공학회.  
 환경부. 2006. 토양·지하수 오염확산방지를 위한 장기 종합기술개발 계획 수립.  
 환경부. 2007. 오염토양 정화방법 가이드라인.  
 환경부. 2008. 베트남 지역별 환경보전 장기종합계획 수립.  
 환경부. 2008.12. 토양·지하수 분야 기술개발 현황 및 동향.  
 환경부. 2009. 토양보전기본계획(2010~2019).  
 환경부. 2009. 환경산업통계조사.  
 환경부. 2010. '09년 특정토양오염관리대상시설 관리현황.  
 환경부. 2010. 토양지하수 오염조사지침 개발 보고서.  
 환경부. 2010.3. 토양정화산업 활성화를 위한 표준화 및 경쟁력 확보방안.  
 환경부. 2010.11. 토양측정망 및 토양오염 실태조사 결과.  
 환경부. 2010. 토양침식 및 유실 방지·보전대책 마련을 위한 기초 연구  
 환경부. 2012. 토양·지하수오염방지기술개발사업 2단계 연구기획.  
 환경부. 2012.11. 「지하수수질관리기본계획」 수립. 한국환경정책·평가연구원.  
 환경부. 2013. 2013년도 토양·지하수오염방지기술개발사업 자체평가보고서.  
 환경부. 2013. 2013년도 국가연구개발사업 성과목표 및 지표.  
 환경부. 2013. 보도자료: 전국 불투수 면적률 조사 결과.  
 환경부. 2013. 유한한 자원인 표토(表土)의 예방적 관리를 위한 표토보전종합계획.  
 환경부. 2013. 표토보전종합계획(13~17)  
 환경부. 2013. 환경산업통계조사.  
 환경부. 2013. 환경백서(2012).  
 환경부. 2013. 환경영향평가지 저영향개발(LID)기법 적용 매뉴얼.  
 환경부. 2014. 환경백서(2013).  
 환경부, 국토해양부, 기획재정부, 교육과학기술부, 국방부, 행정안전부, 문화체육관광부, 농림  
 수산식품부, 보건복지부. 2014. 지하수의 수질보전 등에 관한 통합업무처리지침.  
 환경부. 2015. 비점오염원 사이트, <https://nonpoint.me.go.kr/main.do>  
 환경부. 2015. 환경백서(2014).  
 환경부. 2015. 「토양환경보전법」 법률 제11461호.  
 환경부. 2015. 토양·지하수오염방지기술개발사업 표토자원전략연구단 연차보고서  
 환경부. 2016. 환경생태유량 산정을 위한 모니터링 체계 및 통합모델구축방안 마련.  
 환경부. 2016. 제2차 물환경관리기본계획.

- 환경부. 2017. 환경백서(2016).
- 환경부 고시. 2009. 제2009-101호, 특정토양오염관리 대상 시설의 토양오염방지시설 및 오염 토양의 정화방법 등에 관한 고시.
- 환경부 보도자료. 2008. 9. 환경부·육군 군사시설 토양·지하수 관리 업무협정 체결
- 환경부 보도자료. 2010.2.11. 산업단지 입주 업체 4.6% 토양오염우려기준 초과
- 황상일 등. 2009. 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안(I). 한국환경정책·평가연구원 2009-11.
- 현윤정 외. 2013. 「지표수-지하수 혼합대의 환경측면 및 관리범주 연구」. 한국환경정책·평가연구원.
- 현윤정, 문현주. 2014. 「국내 지하수의 자원·환경적 가치 확립을 위한 기초연구」, 한국환경정책·평가연구원, 48p.
- 현윤정, 이강근, 권덕인, 이성순. 2011. "지하수 종속 생태계에서의 지하수 유동 및 오염물질 거동 모델링", 지질학회지 47(3), p.309-321.
- YTN. 2011.3.24. 구제역 관련 총리 발표문.

[국외문헌]

- ATSDR, 2007, 2007 CERCLA Priority List of Hazardous Substances That Will Be the Subject of Toxicological Profiles and Support Document.
- Altieri, A. and Letourneau, D. K., 1982, Vegetation management and biological control in agorecosystems. *Crop Protection* 1 405-430.
- Anisimov, O. A. et al., 2007, Uncertainties in gridded air temperature fields and their effect on predictive active layer modeling. *Journal of Geophysical Research*. 112, F02S14, doi:10.1029/2006JF000593.
- Artmann, M., 2014, Assessment of Soil Sealing Management Responses, Strategies, and Targets Toward Ecologically Sustainable Urban Land Use Management. *AMBIO* 43:530–541.
- Bardgett, R. D. et al., 2001, The influence of soil biodiversity on hydrological pathways and the transfer of materials between terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems*. 4(5):421-429.
- Bardos, R. P., Damigos E., Goubier R. et al., 1994, Waste 92 Area IX; Survey of EU Member States: Contaminated Land : Definitions, Registers and Priorities of Action, AEA Technology, National Environmental Technology Centre. Oxfordshire, UK.
- Batubara, B., O. Batelaan and P. Quevauviller, 2014, Science-policy Interfacing on the Issue of Groundwater and Groundwater-dependent Ecosystems in Europe: Implications for

Research and Policy.

- Bellamy, P. H. et al., 2005, Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* 437:245-248.
- Berntson, G. M. and F.A. Bazzaz., 1997, Nitrogen cycling in microcosms of yellow birch exposed to elevated CO<sub>2</sub>: Simultaneous positive and negative below-ground feedbacks". *Global Change Biology* 3(3):247-258.
- Business Round Table, 1993, Comparison of Superfund with Programs in Other Countries. Washington, DC. 117pp.
- Blanchart, E. et al., 2004, Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion". *Agriculture Ecosystems & Environment*. 104(2):303-315.
- Blum, W. E. H., 1993, Soil Protection Concept of the Council of Europe and Integrated Soil Research, in H. J. P. Eijsackers and T. Hamer (eds.), *Integrated Soil and Sediment Research: A basis for Proper Protection, Soil and Environment*, Vol. 1. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 37–47.
- BMLFUW (Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management). 2002, Die österreichische Strategie zur Nachhaltigen Entwicklung Eine Initiative der Bundesregierung (The Austrian Strategy for Sustainable Development – An Initiative of the Federal Government).
- BMLFUW, 2007 & 2009. Monitoring Nachhaltiger Entwicklung in Österreich-MONE (Monitoring Sustainable Development in Austria). <http://www.nachhaltigkeit.at/>
- BMLFUW, 2008, (Bau)Land in Sicht. Gute Gründe zur Verwertung industrieller und Gewerblicher Brachflächen (Land for Building in Sight – Good reasons to reuse industrial and commercial brownfields). <http://gpool.lfrz.at/gpool/main.cgi?rq=ed&etid=38&eid=1051&oid=229&th=1>.
- BMLFUW, 2011, Austrian Strategy for Sustainable Development.
- Bradley, I. et al., 2005. Impacts of climate change on soil functions. DEFRA Project SP0538.
- British Waterways, 2008, Consultation response. <http://www.wellcome.ac.uk/About-us/Policy/Consultation-responses/index.htm>.
- CCICED Reports of Task Force Team, 2010, CCICED(China Council for International Cooperation on Environment and Development) Special Policy Study Report: Developing policies for soil environmental protection in China. CCICED 2010 Annual General Meeting November 10-12, 2010.
- Crumbling, D. M., 2004, Summary of the Triad approach. U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.
- CEC (Commission of the European Communities), 1992. CORINE project.

- Cerda, A. and M.F. Jurgensen., 2008, The influence of ants on soil and water losses from an orange orchard in eastern Spain. *Journal of Applied Entomology* 132(4):306-314.
- China, 2016. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/China>.
- Christine, C. and Weigelt, J., 2015, SOIL ATLAS Facts and figures about earth, land and fields. Joint Pub of Heinrich Boll Foundation, Berlin, Germany, and the Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam, Germany.
- Coonan, C. 9 November 2007, "The gathering sandstorm: Encroaching desert, missing water". *The Independent*. Archived from the original on 24 April 2008. Retrieved 23 July 2014.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasson, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Oneill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.
- Council of Europe, 1972, European Soil Charter. Committee of Ministers.
- Crumbling, D. M., 2004, Summary of the Triad approach. U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.
- Decaens, T. et al., 2006, The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*. 42:S23-S38.
- DEFRA, 2006, Assessing risks from land contamination-A Proportionate Approach.. *Soil Guidance Values: the Way Forward*.
- DEFRA, 2009, Safeguarding our Soils A Strategy for England. <http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/land/soil/documents/soil-strategy.pdf>.
- DEFRA, 2009, Construction Code of Practice for the Sustainable Use of Soils on Construction Sites. <http://www.defra.gov.uk/publications/files/pb13298-code-of-practice-090910.pdf>.
- DEFRA, 2009, Soil strategy for england supporting evidence paper.
- DEFRA, 2009, Safeguarding out soils A Strategy for England. <http://defraweb/environment/land/soil/index.htm>
- DERFA, 2010, Contaminated Land Remediation. UK DEFRA.
- DEFRA, 2011, Guidelines for environmental risk assessment and management. Green Leaves III. UK DEFRA.
- DEFRA, 2015. <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-environment-food-rural-affairs>.
- DE REGIO, 2011, Comparable statistical data. [http://ec.europa.eu/regional\\_policy/activity/urban/audit/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/regional_policy/activity/urban/audit/index_en.cfm).

- Deumlich, D., 1995, Landschaftsindikator Bodenerosion, in: Bork, H.-R., Dalchow, C., Kachele, H., Piorr, H. P., Wenkel, K.-O. Agrarlandschaftswandel in Nordost-Deutschland unter veränderten Rahmenbedingungen: ökologische und ökonomische Konsequenzen, Berlin, p241-263.
- Dupius, J and Knoepfel, P., 2015, *The Politics of Contaminated Sites Management*. Springer.
- Dubrovsky, N.M., Burow, K.R., Clark, G.M., Gronberg, J.M., Hamilton P.A., Hitt, K.J., Mueller, D.K., Munn, M.D., Nolan, B.T., Puckett, L.J., Rupert, M.G., Short, T.M., Spahr, N.E., Sprague, L.A., and Wilber, W.G., 2010, *The quality of our Nation's waters—Nutrients in the Nation's streams and groundwater, 1992–2004: U.S. Geological Survey Circular 1350*.
- EA (Environment Agency), 2004, *The State of Soils in England and Wales*. [http://www.adlib.ac.uk/resources/000/030/045/stateofsoils\\_775492.pdf](http://www.adlib.ac.uk/resources/000/030/045/stateofsoils_775492.pdf).
- EA, 2007, *The Total External Environmental Costs and Benefits of Agriculture in the UK*. <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Resea>.
- EA, 2007, *Dealing with contaminated land in England and Wales*.
- EA, 2007, *Using Science to create a better place. Design and operation of a UK soil monitoring network*. Science Report–SC060073. Environment Agency Publication. Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
- EA, 2009.1., *Dealing with contaminated land in England and Wales*.
- EBI(Environmental Business International). 2015. *Environment market data*
- EC (European Commission), 1992, Directive 92/43/EEC, *The conservation of natural habitats and of wild fauna and flora*.
- EC, 2002, *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the economic and social committee and the committee of the regions. Towards a Thematic Strategy for Soil Protection*. Brussels, 16.4.2002. COM(2002) 179 final.
- EC, 2004, Directive 2004/35/CE, *Environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage*.
- EC, 2006, *Soil protection: The story behind the Strategy*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- EC, 2006, *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European economic and social committee and the committee of the regions. Thematic Strategy for Soil Protection. Impact assessment of the thematic strategy on soil protection {COM(2006)231 final} {SEC(2006)1165}*.
- EC, 2007, *Environment fact sheet: Soil protection-a new policy for the EU*. European Commission.

- EC, 2008, Groundwater Protection in Europe: the new groundwater directive-consolidating the EU regulatory framework.
- EC, 2011, WFD(2000/60/EC) Technical report No.6: Technical report on groundwater dependent terrestrial ecosystems.
- EC, 2011, Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Roadmap to a Resource Efficient Europe. Brussels, 12.4.2012. SWD(2012).
- EC, 2012, Commission staff working document. Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing. Brussels, 12.4.2012 SWD(2012) 101 final.
- EC, 2015, Technical report on groundwater associated aquatic ecosystems.
- EC, 2016, The Nitrates Directive.  
[http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index_en.html).
- EC DG ENV, 2006, Study on Eco-industry, its size, employment, perspectives and barriers to growth in an enlarged EU, Final report.
- EC DG ENV, 2012, The European Soil Data Centre: a one-stop-shop for soil science. Science for Environmental Policy-DG Environment News Alert Service. European Commission DG ENV News Alert Issue 272 (9 February 2012).
- EC DG REGIO, 2011, Cities of tomorrow-Challenges, visions, ways forward. Directorate-General for Regional Policy, European Commission, Luxembourg: Publications Office of the European Union. 112 pp.  
[http://ec.europa.eu/regional\\_policy/conferences/citiesoftomorrow/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/regional_policy/conferences/citiesoftomorrow/index_en.cfm).
- EC/JRC (Joint Research Centre), 2015, European Soil Portal-Soil Data and Information Systems. [http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/pesera/pesera\\_download.html](http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/pesera/pesera_download.html).
- EC/JRC European Soil Data Centre, 2011-2012, European Environment Information and Observation Network (EIO-NET). EEA and JRC Press.
- EEA (European Environment Agency), 2000. 06., Management of contaminated sites in Western Europe.
- EEA, 2007, Europe's Environment The 4th Assessment.  
[http://www.nuigalway.ie/administration\\_services/buildings\\_office/documents/eea\\_far\\_fourth\\_assessment\\_report\\_2007.pdf](http://www.nuigalway.ie/administration_services/buildings_office/documents/eea_far_fourth_assessment_report_2007.pdf).
- EEA, 2010, The European environment-state and outlook 2010: Assessment on global megatrends. European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA, 2010,SOER (The European Environment State and Outlook) 2010 Soil. EEA and JRC Press.
- EEA, 2013, Environmental indicator report 2013-Natural resources and human well-being in

- a green economy, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- EEA, 2013, Land take (CSI 014/LSI 001)-Assessment. <http://www.eea.europa.eu/dataand-maps/indicators/land-take-2/assessment-2>.
- EEA, 2015, CORINE (Coordination of information on the environment) Project. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.
- EEA, 2015, SOER (The European environment-state and outlook) 2015: Synthesis report, European Environment Agency, Copenhagen. p59-60. European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA Directive 2004/35/CE, Environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage.
- EEA Directive 92/43/EEC, The conservation of natural habitats and of wild fauna and flora.
- End, A. and Berger, G., 2014, The 7th Environment Action Programme: Reflections on sustainable development and environmental policy integration. ESDN Quarterly Report N°32. European Sustainable Development Network.
- Environmental Business International Inc., 2009, San Diego, Calif.
- Environmental Business International Inc., 2010, EBI REPORT 2020-THE U.S. Environmental Industry & Global Market.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1992, Superfund at Work: Valley of the Drums Cleanup : A Superfund Benchmark (EPA 520/F-92-006). Washington D.C.: Office of Solid Waste and Emergency Response.
- EPA, 2008a. Annual Report to Congress FY 2004.
- EPA, 2008b. Reducing urban heat islands. Compendium of strategies. Chapter 2: Trees and vegetation. <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>.
- EPA, 2010, Superfund Green Remediation Strategy.
- EPA, 2010, Superfund Remedy Report 13th Edition.
- EPA, 2011, FY 2011 EPA Budget in Brief.
- EPA, 2011, EPA Launches New Strategy to Promote Use of Green Infrastructure for Environmental and Economic Benefits. Press release 29.04.2011.
- ERDF Regulation, 2006, Regulation (EC) No 1080/2006 of the European Parliament and of the Council of 5 July 2006 on the European Regional Development Fund and repealing Regulation (EC) No 1783/1999.
- ESDAC (European Soil Data Centre), 2016a. Soil Susceptibility to Compaction. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-susceptibility-compaction>.
- ESDAC, 2016, Soil Sealing. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-sealing>.
- ESDAC, 2016, Erosion. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/themes/erosion>.

ESDAC, 2016, European Soil Portal. <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu>.

ESDAC, 2016, Soil Contamination <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-contamination>

EUSOILS, 2015, <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu>.

EU, 2009, Soils Policy: EU Soil Thematic Strategy.

EU, 2012, SuPerBuildings and OPEN HOUSE. <http://cic.vtt.fi/superbuildings/node/2> and <http://www.openhouse-fp7.eu/>.

EU, 2013, Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 Living well, within the limits of our planet, OJ L 354, 20.12.2013, p171–200.

EU, 2013, Nitrate Directive ANNEX 4.

EUROSTAT, 2010. Road Transport Infrastructure [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search\\_database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database)

Evans, R. 1996. Soil Erosion and its Impact in England and Wales. Friends of the Earth Trust, London.

EPA, <http://www.epa.gov/brownfields/about.htm>.

FRTR, [https://frtr.gov/matrix2/top\\_page.html](https://frtr.gov/matrix2/top_page.html).

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1982. World soil charter.

Federal Government, 2012. National Sustainable Development Strategy 2012 Progress Report. Federal Government 11044 Berlin.

Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, 2017. Grundwasser. [http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarb/Politikberatung\\_GW/Grundwasser\\_IWRM/Grundwasser\\_NEXUS/grundwasser\\_nexus\\_node\\_en.html](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarb/Politikberatung_GW/Grundwasser_IWRM/Grundwasser_NEXUS/grundwasser_nexus_node_en.html).

Federal Ministry for the Environment, Nature Protection and Nuclear Safety, 2002, German Federal Government Soil Protection Report. Bundestags-Drucksache 14/9566.

Federal Ministry for the Environment, Nature Protection and Nuclear Safety, 2017, Groundwater. 검색일, 2017.3.11. <http://www.bmub.bund.de/en/topics/water-waste-soil/water-management/groundwater/>

Ferguson, C., and Kasamas, H., 1999, Risk Assessment for Contaminated Sites in Europe, Volume 2 Policy Frameworks. LQM Press. UK.

Fonseca, J., 2008, Aquifer monitoring for groundwater-dependant Ecosystems, Pima County, Arizona, pp.1-10. [http://www.pima.gov/cmo/sdcp/monitoring/pdf/Fonseca\\_2008\\_Groundwater\\_monitoring.pdf](http://www.pima.gov/cmo/sdcp/monitoring/pdf/Fonseca_2008_Groundwater_monitoring.pdf)

- Frank, A. S.. 1999, "Risk-Based Assessment of Soil and Groundwater Quality in the Netherlands: Standards and Remediation Urgency". *Risk Analysis*. 19(6):1235-1249.
- Froberg, K., Dehio, J., Strotmann, B., Weingarten, P. 1994. Agriculturally Induced Pollution Problems in Germany, in: Napier, T. L., Camboni, S. M., El-Swaify, S. A. *Adopting Conservation on the Farm. An International Perspective on the Socioeconomics of Soil and Water Conservation*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, pp. 269-288.
- FOREGS (Forum of European Geological Survey, 현재 EuroGeoSurveys), 2005, *Geochemical Atlas of Europe*, Forum of European Geological Surveys.
- Franzius, V., 1992, October. Recent development in national programs, Federal Republic of Germany. Contribution to the Tour-de-Table. Summary Report. The 1992 NATO/CCMS Pilot Study Meeting on Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment and Clean-up of Contaminated Land and Groundwater. Budapest.
- FRTR (Federal Remediation Technologies Roundtable), 2007, *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*. Version 4.0. <https://frtr.gov/matrix2/section4/4-7.html>.
- Gardia, C., Panagosa, P., Van Liedekerke, M., Boscob, C., and De Brognieza, D., 2015, Land take and food security: assessment of land take on the agricultural production in Europe. *Journal of Environmental Planning and Management*. V58, Issue 5, 898-912.
- Gilliom, R. J., Barbash, J. E., Crawford, C. G., Hamilton, P. A., Martin, J. D., Nakagaki, N., Nowell, L.H., Scott, J.C., Stackelberg, P.E., Thelin, G.P., Wolock, D. M., 2006, *Pesticides in the nation's streams and ground water, 1992-2001*. U.S. Geological Survey Circular 1291.
- Goidts, E. and van Wesemael, B., 2007, Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in southern Belgium (1955-2005). *Geoderma* 141:341-354.
- Government of the Netherlands, 2017, *Water management*. <https://www.government.nl/topics/water-management/contents/water-quality/quality-of-ground-water>. 검색일 2017.3.19.
- GSP (Global Soil Partnership), 2012, *Strategic Objectives* [online]. [http://www.fao.org/nr/water/landandwater\\_gsp.html](http://www.fao.org/nr/water/landandwater_gsp.html) [Accessed 30 October 2012].
- Gündra, H., Jäger, S., Schroeder, M., Dikau, R., 1995, *Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg*, Agrarforschung in Baden-Württemberg 24.
- GIMS, 2015, <http://www.gims.go.kr>.

- Grimm, M., Jones, R. and Montanarella, L., 2002, Soil Erosion Risk in Europe. European Soil Bureau Institute for Environment & Sustainability JRC Ispra. European Commission/Joint Research Centre.
- Hansen, A. J. et al., 2002, Effects of exurban development on biodiversity: Patterns, mechanisms, and research needs. 87th Annual Meeting of the Ecological Society of America, Tuscon, AZ.
- Hanza, M.A., and W.K. Anderson, 2005, Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82:121-145.
- Helgason, T. et al., 1998, Ploughing up the wood-wide web? *Nature* 394(6692):431-431.
- HM Government, 2009, UK Low Carbon Transition Plan White Paper: National Strategy for Climate and Energy. [http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/publications/lc\\_trans\\_plan/lc\\_trans\\_plan.aspx](http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/publications/lc_trans_plan/lc_trans_plan.aspx).
- Honders, T., 2009, Soil+, expertise on soil and sediments. New legislation on the sustainable reuse of lightly contaminated soil in The VROM. (2017.04.03.) [http://www.insavalor.fr/wascon2009/fichiers\\_envoyes/Ton%20Honders.pdf](http://www.insavalor.fr/wascon2009/fichiers_envoyes/Ton%20Honders.pdf)
- Honders, T., 2016, Soil environmental policies in the Netherlands-sharing experiences. VROM. (2017.04.03.) [http://www.uic.org/IMG/pdf/soil\\_environmental\\_policies\\_in\\_the\\_netherlands\\_sharing\\_experiences.pdf](http://www.uic.org/IMG/pdf/soil_environmental_policies_in_the_netherlands_sharing_experiences.pdf)
- Honders, T., 2011, Soil environmental policies in the Netherlands – sharing experiences. VROM. (2017.04.03.) [https://www.google.co.kr/webhp?sourceid=chrome-instant&rlz=1C1YKST\\_koKR711KR711&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#nfpr=1&q=Soil+environmental+policies+in+the+Netherlands-sharing+experiences&](https://www.google.co.kr/webhp?sourceid=chrome-instant&rlz=1C1YKST_koKR711KR711&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#nfpr=1&q=Soil+environmental+policies+in+the+Netherlands-sharing+experiences&)\*
- Hoff, H., 2011, Understanding the nexus. Background paper for the Bonn 2011 conference: The water, energy and food security nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute.
- Horz, H. P. et al. 2004, Ammonia-oxidizing bacteria respond to multifactorial global change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 101(42):15136-15141.
- Houšková, B., 2008, Natural susceptibility to soil compaction in Europe [http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/Compaction.jpg](http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/public_path/Compaction.jpg).
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Lexer, W., Möller, A., Rickson, R.J., Shishkov, T., Stephens, M., Toth, G., Van den Akker, J.J.H., Varallyay, G., Verheijen, F.G.A., Jones, A.R. (eds.) 2008. Environmental

- Assessment of Soil for Monitoring: Volume I Indicators and Criteria. EUR 23490 EN/1. Office for the Official Publication of the European Communities, Luxembourg, 339 pp.
- Hurni, H., Giger, M., Liniger, H., Studer, R. M., Messerli, P., Portner, B., Schwilch, G., Wolfgramm, B., and Brey, T. 2015. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 15:25–34.
- IASS/GSF (Institute for Advanced Sustainability Studies/Global Soil Forum). 2013. Soil Sealing. [www.iass-potsdam.de](http://www.iass-potsdam.de) and [www.globalsoilweek.org](http://www.globalsoilweek.org)
- IASS, 2012. Institute of Regional Development Planning, University of Stuttgart, 2012.
- IASS, 2015. IASS2015 Annual International Symposium on Future Visions.
- ICSU, ISSC (International Council for Science, International Social Science Council) 2015. *Review of the Sustainable Development Goals: The Science Perspective*. Paris: International Council for Science (ICSU).
- IFEN, 2005. Les changements d'occupation des sols de 1990 à 2000 : plus d'artificiel, moins de prairies et de bocages. *Les données de l'environnement* 101:4.
- Jeffery, S. Gardi, C. Jones, A. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, L. Ritz, K. Peres, G. Römbke, J. van der Putten, W. H. (eds.) 2010. *European Atlas of Soil Biodiversity*. European Commission. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Jones, R. 2008. Current problems of soil protection as seen from the UK. *Europäische Akademie*, Berlin.
- Jones, R. J. et al. 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research* 73(1-2):131-143.
- Jones, J. A., Bissonais, Y. L., Diaz, J. S., Düwel, O., Øyegarden, L., Bazzoffi, Prasuhn, V., Yordanov, Y., Strauss, P., Rydell, B., Uveges, J. B., Loj, G., Lane, M. and Vandekerckhove, L. 2003. *EU Soil Thematic Strategy: Technical Working Group on Erosion. Work Package 2: Nature and extent of soil erosion in Europe. Interim report 3rd DRAFT(v3.31)*.
- Jones, R. J. A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P. J. and Montanarella, L. 2004. The map of organic carbon in top soils in Europe, Version 1.2, September 2003: Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.72 (S.P.I.04.72). *European Soil Bureau Research Report No.17, EUR 21209 EN, 26pp. and 1 map in ISO B1 format*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Kappel, W. M., Williams, J. H., & Szabo, Z. 2013. *Water resources and shale gas/oil production in the Appalachian Basin: critical issues and evolving developments (No. 2013-1137)*. US Geological Survey.

- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., Schuman, G. E. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*. 61(1):4-10.
- Khan, O. 2014. *Soil Degradation, Conservation, and Remediation*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London. 237p.
- Kemper, W. D. and Koch, E. J., 1966. Aggregate stability of soils from Western United States and Canada. USDA Technical Bulletin n° 1355, Washington DC, USA.
- Kerry, B. R., and D. H. Crump, 1998. The dynamics of the decline of the cereal cyst nematode, *Heterodera avenae*, in four soils under intensive cereal production. *Fund. Appl. Nematol.* 21: 617–625.
- Kingsbury, G., and Bingham, T. 1992. *Reclamation and Redevelopment of Contaminated Land. Vol II: European Case Studies (EPA 600/R-92-031)*. Cincinnati, OH. U.S. EPA. Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratories.
- Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D. Hill, R., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., Barbier, E., Binkley, D., Parton, W., Wall, D. H., Bird, M., Bouma, J., Chenu, C., Flora, C. B., Goulding, K., Grunwald, S., Hempel, J., Jastrow, J., Lehmann, J., Lorenz, K., Morgan, C., C. W. Rice, Whitehead, D., Young, I., and Zimmermann, M. 2013. *Soil Security: Solving the Global Soil Crisis*. Global Policy. doi: 10.1111/1758-5899.12096.
- Kraemer, A., Landgrebe-Trinkunaite, R., Görlach, B., Kranz, N., and Verbücheln, M. 2004. *EU Soil Protection Policy: Current Status and the Way Forward*. Ecologic Institute for International and European Environmental Policy. [www.ecologic.de](http://www.ecologic.de).
- Kurian, M and Ardakanian, R. (eds) 2015, *Governing the Nexus Water, Soil and Waste Resources Considering Global Change*. United Nations University (UNU-FLORES) Dresden, Germany. 230p.
- Lafan, J. M., and Moldenhauer, W. C. 2003, *Pioneering soil erosion prediction, USLE Story*. WASWC Special Pub. No1:pp54.
- Lal, R. and Kimble, J. M. 1997, Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49(1-3):243-253.
- Lal, R. 1999, Soil quality and food security: The global perspective. Ch. 1 in R. Lal (ed.) *Soil quality and soil erosion*. CRC Press, Boca Raton, FL:pp329.
- Lal, R., D. Mokma, B. Lowery. 1999, Relation between soil quality and erosion. Ch. 14 in R. Lal (ed.) *Soil quality and soil erosion*. CRC Press, Boca Raton, FL:pp329.
- Lal, R. 2004, Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304(5677):1623-1627.

- Lal, R., Follett, F., Stewart, B. A., and Kimble, J. M. 2007, Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science* 172(12):943-956.
- Lal, R. 2010, Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. *Bioscience*, 60:708–712.
- Lal, R. 2015a, The Nexus Approach to Managing Water, Soil and Waste under Changing Climate and Growing Demands on Natural Resources. p39-62 in: Kurian, M and Ardakanian, R. (eds) *Governing the Nexus Water, Soil and Waste Resources Considering Global Change*. United Nations University (UNU-FLORES) Dresden, Germany.
- Lal, R. 2015b. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 7:5875-5895.
- Lavelle, P. et al. 1997, Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*. 33(4):159-193.
- Lavelle, P. et al. 2004, Vulnerability of ecosystem services at different scales: role of biodiversity and implications for management. *Sustaining Biodiversity and functioning in soils and sediments*. D. Wall. New York, Island Press.
- Leake, S. A. 2016, "land Subsidence from groundwater pumping". <https://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside/>.
- Ledbetter, K. 2015, Soil security vital for the health, wealth of the world. <http://today.agrilife.org/2015/06/22/soilsecurityvitalforthehealthwealthoftheworld/>.
- LIFE Environment, 2014, LIFE and Soil protection. Luxembourg: Publications Office of the European Union. European Union.
- Magleby, R., 1984. Natural Resources and Environment Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. *Agriculture Information Bulletin* No. 718.
- McBratney, A. B., Minasny, B., Wheeler, I. and Malone, B. P. 2012, Frameworks for Digital Soil Assessment. pp.9-14 In B. Minasny, B. P. Malone and A. B. McBratney (eds.), *Digital Soil Assessment and Beyond*. London: Taylor and Francis.
- McBratney, A., Field, D., and Koch, A., 2014, The dimensions of soil security. *Geoderma* 213:203–213.
- McDonnell, M. J. et al., 1993, The application of the ecological gradient paradigm to the study of urban effects. 4th Cary Conference on Humans as Components of Ecosystems - The Ecology of Subtle Human Effects and Populated Areas, Millbrook, NY.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005, *Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis*. Washington, D.C., World Resources Institute.

- Mukherji, A., 2017, Food-Irrigation-Energy Nexus in the context of groundwater use in India: Experience from three Indian States. [http://wef-conference.gwsp.org/uploads/media/D06\\_Mukherji.pdf](http://wef-conference.gwsp.org/uploads/media/D06_Mukherji.pdf). International Centre for Integrated Mountain Development.
- Montanarella, L. and Alva, I. L., 2015, Putting soils on the agenda: the three Rio Conventions and the post-2015 development agenda. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2015, 15:41–48.
- Montanarella L. and Houšková B., 2008, Map of Soil Susceptibility to Compaction in Europe. *Proceedings of the 5th International Congress of ESSC - European Society for Soil Conservation - Changing Soils in a Changing World: the Soils of Tomorrow* p. 254. Università di Palermo.
- MSNBC, 24 November 2008, "Himalaya glaciers melting much faster". Retrieved 21 September 2011.
- Müller, A., Janetschek, H., Weigelt, J., 2015, Towards a governance heuristic for sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 15:49–56.
- NISTEP (Yoshihisa Takei), 2010, *Current State and Future Prospects of Action for Soil Contamination*.
- Nooren, C. A. M. et al., 1995, "The Role of Earthworms in the Formation of Sandy Surface Soils in a Tropical Forest in Ivory-Coast" *Geoderma* 65(1-2):135-148.
- Office of Emergency and Remedial Response, 2009, *Risk Assessment Guidance for Superfund*, U.S. Environmental Protection Agency EPA/540/1-89/002.
- OECD, 2012, *OECD Environmental Outlook to 2050*, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
- Office of Emergency and Remedial Response, 2009, *Risk Assessment Guidance for Superfund*, U.S. Environmental Protection Agency EPA/540/1-89/002.
- Official Journal of the European Union, 2013, DECISION No 1386/2013/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet' 28.12.2013. L 354/171.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A. and Sombroek, W. G., 1991, *World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation, with Explanatory Note (second revised edition)* - ISRIC, Wageningen; UNEP, Nairobi.
- ÖROK (Österreichisches Raumentwicklungskonzept), 2001, ÖREK 2001 (Austrian Spatial Development Concept, 2001).
- Page, G. W., 1997, *Contaminated Sites and Environmental Cleanup*. International

- Approaches to Prevention, Remediation, and Reuse. Academic Press. 212p.
- Panagos, P., Imeson, A., Meusburger, K., Borrelli, P., Poesen, J., and Alewell, C., 2016, Soil Conservation In Europe: Wish Or Reality? *Land Degrad. Develop.* 27: 1547–1551.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., and Montanarella, L., 2013, Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network. *Journal of Environmental and Public Health*. Art. no. 158764, doi:10.1155/2013/158764.
- Panagos, P., Hiederer, R., Van Liedekerke, M., and Bampa, F., 2013, Estimating soil organic carbon in Europe based on data collected through an European network. *Ecological Indicators* 24:439–450.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A. & Montanarella, L., 2012, European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*. 29: 329-338.
- Paul, B., Anita, L., 2001.09., Review of Decision Support Tools and their use in Europe: Report of CLARINET Working Group 2. UK DEFRA. p.118 Online Available: <http://www.r3environmental.co.uk/wg2%20report%20web%20version.pdf>.
- Pauwels, H., Muller, D., Griffionen, J., Hinsby, K., Melo, T., Brower, R., 2007, Bridge Project. Publishable final activity report.
- Pimentel, D. et al., 1995, Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*. 267(5201): 1117-1123.
- Pimentel, D. et al., 1997, Economic and environmental benefits of biodiversity. *Bioscience* 47(11):747-757.
- Pimentel, D. and N. Kounang, 1998, Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems* 1(5):416-426.
- Prager, K., 2008, Soil conservation and policy measures finding from eight case studies across Europe. ECOMIT Conference in Piestany, Slovakia, 5-7 November 2008.
- Prokop, G., Schamann, M. and Edelgaard, I., 2000, Management of contaminated sites in Western Europe. European Environment Agency. Copenhagen, Denmark.
- Prokop G., Jobstmann H., Schönbauer A., 2011, Overview on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects in EU-27 (Environment Agency Austria), Technical Report-2011-50, ISBN: 978-92-79-20669-6. <http://ec.europa.eu/environment/soil/sealing.htm>.
- Puget, P., Lal, R., Izaurrealde, C., et al., 2005, Stock and distribution of total and corn-derived soil organic carbon in aggregate and primary particle fractions for different land use and soil management practices. *Soil Science* 170(4):256–279.

- Robinson, D. A., Lebron, L., and Vereecken, H., 2009, On the definition of the natural capital of soils: a framework for description, evaluation and monitoring. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1904–1911.
- Robinson, D. A., D. Cooper, B. A. Emmett, C. D. Evans, A. Keith, I. Lebron, S. Lofts, L. Norton, B. Reynolds, E. Tipping, B. G. Rawlins, A. M. Tye, C. W. Watts, W. R. Whalley, H. I. J Black, G. P. Warren, S. Robinson, K. Michaelides, N. J. Hockley, 2010, Defra soil protection research in the context of the soil natural capital / ecosystem services framework. In, Project SP1607: Synthesis of Soil Protection work 1990-2008. Centre for Ecology and Hydrology, UK.
- Ruser R., Flessa H., Russow R., Schmidt G., Buegger, F. and Munch J. C., 2006, Emission of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting, *Soil Biology and Biochemistry* 38:263–274.
- Schmidt, H., Ha, N.B., Pfannkuche, J., Amann, H., Kronfeldt, H.D. and Kowalewska, G., 2004, Detection of PAHs in seawater using surface-enhanced Raman scattering (SERS), *Marine Pollution Bulletin* 49:229-234.
- Sonneveld, B. and Dent, D., 2007, How good is GLASOD? *Journal of Environmental Management* 90(2009):274-283.
- Statistisches Bundesamt (National Statistical Agency), 2009, Bundesamt für Naturschutz (National Agency for Nature Protection) 2010. Fläche im Kreis. [http://www.flaeche-im-kreis.de/english\\_version.phtml](http://www.flaeche-im-kreis.de/english_version.phtml).
- Schils, R., P. Kuikman, and J. Liski., 2008, Review of existing information on the interrelations between soil and climate change. p.205.
- Scottish Government, 2009, The Scottish Soil Framework. website: [www.scotland.gov.uk](http://www.scotland.gov.uk).
- Shuur, E. A. G. and Abbott, B., 2011, High Risk of Permafrost Thaw. *Nature* 480:32–33.
- Soczko, E., Meeder, T., and Versluijs. 1992. October. Ten years of soil clean-up in the Netherlands. Contribution to the Tour-de-Table. Summary Report. The 1992 NATO/CCMS Pilot Study Meeting on Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment and Clean-up of COntaminated Land and Groundwater. Budapest.
- Statistisches Landesamt Baden Württemberg (Statistical Survey of Baden Württemberg), 2009, Flächenverbrauch 2008 (Land Take 2008). [https://www.statistik-bw.de/Pressemitt/Pressehefte/Flaechenverbrauch\\_2008.pdf](https://www.statistik-bw.de/Pressemitt/Pressehefte/Flaechenverbrauch_2008.pdf)
- Strebotak, T., C. Polzin, S. Gljm, S. Herbert, S. Lutter, 2010, Establishing environmental sustainability threshold and indicators. Final Report. SERI:pp138.
- Stubb, M., 2012, Conservation Compliance and U.S. Farm Policy Congressional Research

- Service 7-5700:pp18 <http://www.crs.govR42459>.
- TAEU (Territorial Agenda of the European Union), 2011, Territorial Agenda of the European Union 2020, Towards an Inclusive, Smart and Sustainable Europe of Diverse Regions, Gödöllő (Hungary), 19 May 2011. <http://www.eu2011.hu/files/bveu/documents/TA2020.pdf>.
- Tansley, A., 1935, The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *Ecology*. 16(3):284-307.
- The Netherlands Ministry of Housing, Physical Planning, and Environment, 1983, April. Leidraad Bodemscherming (Soil Cleanup Guidance Note : Assessing the Severity of a Case of Soil Contamination in The Netherlands. The Hague.
- Toth T, Bodis K, and Stolbovoy V., 2008, Updated Map of Salt Affected Soils in the European Union. In: Tóth, G., Montanarella, L. and Rusco, E. (Eds.) Threats to Soil Quality in Europe. EUR23438.
- Turbé, A., De Toni, A., Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Ruiz, N., Van der Putten, W. H., Labouze, E. and Mudgal, S., 2010, Soil biodiversity: Functions, threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment).
- Ulrici W, 1995, International Experience in Remediation of Contaminated Sites, Synopsis, Evaluation and Assessment of Applicability of Methods and Concepts, Federal Ministry of Education, Science, Research and Technology. Germany.
- Umlauf, G., Bidoglio, G., Christoph, E., Kampheus, J., Krueger, F., Landmann, D., Schulz, A. J., Schwartz, R., Severin, K., Stachel, B., Stehr, D., 2005, The situation of PCDD/Fs and Dioxin-like PCBs after the flooding of River Elbe and Mulde in 2002'. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologia* 33, 5 (Special Issue: Displacement of Pollutants during the River Elbe Flood in August 2002), p543–554.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 2011, Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication - A Synthesis for Policy Makers. <http://www.unep.org/greeneconomy>.
- UNGA (United Nations General Assembly), 2014, Report of the Open Working Group of the General Assembly on Sustainable Development Goals. Sixty-eighth session Agenda items 14, 19(a) and 118.
- USDA. 2011. RCA(Soil and Water Resources Conservation Act) Appraisal 2011. USDA:pp164.
- USDA/NRSC (US Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service), 2003, Managing Soil Organic Matter The Key to Air and Water Quality. <http://soils.usda.gov/sqi>.

- USDA/NRSC, 2015, Conservation Effects Assessment Project (CEAP).
- USDA/NRSC, 2005, Managing Soil Organic Matter The Key to Air and Water Quality. Managing Soil Organic Matter The Key to Air and Water Quality.
- USDA/NRCS, 2006, Conservation resource brief. Soil Erosion. No. 0602:pp9.
- van Arnheim, P., 1994, Dossier of Contaminated Property: Transaction, Lease, Development, Finance, Appraisal. Amsterdam V.T. Productions.
- van der Knijff, J.M., 2000, Soil Erosion Risk Assessment in Europe, European Soil Bureau.
- van der Putten, W. H. et al., 2006, Nematode interactions in nature: Models for sustainable control of nematode pests of crop plants? *Advances In Agronomy*. San Diego. Elsevier Academic Press Inc. 89:227-260.
- van Liedekerke, M., Prokop, G., Rabl-Berger, S., Kibblewhite, M., and Louwagie, G., 2014, Progress in the management of Contaminated Sites in Europe. Joint Research Centre of the European Commission. European Union.
- Verheijen, F. G. A., Bellamy, P. H., Kibblewhite, M. G. and Gaunt, J. L., 2005, Organic carbon ranges in arable soils of England and Wales. *Soil Use and Management* 21:2-9.
- Visser, W. J. F., 1993, Contaminated Land Policies in Some Industrialized Countries. Technical Soil Protection Committee (Technische Commissie Bódembescherming). The Hague, The Netherlands.
- VROM (Ministrie Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment), 1997.03., Good ground for growth; New incentives for soil remediation. Netherland. Online Available : <http://www2.minvrom.nl/Docs/international/ground.pdf>.
- VROM, 1999.10., From funnel to sieve; Remediation goal appraisal process. Netherland. Online Available: <http://www2.minvrom.nl/Docs/international/VTNZengels.pdf>.
- VROM, 1999.10., From funnel to sieve; Remediation goal appraisal process. Netherland. Online Available: <http://www2.minvrom.nl/Docs/international/VTNZengels.pdf>.
- VROM, 1999, Policy Document "How to Deal with Contaminated Excavated Soil". Netherland. Online Available : <http://www2.minvrom.nl/Docs/international/Infoleaflet.pdf>.
- VROM, 1999, Policy Document "How to Deal with Contaminated Excavated Soil". Netherland. Online Available : <http://www2.minvrom.nl/Docs/international/Infoleaflet.pdf>.
- VROM, 2000, Circular on target values and intervention values for soil remediation. Netherlands.
- VROM, 2010, Into Dutch Soils. VROM. (2017.04.03.)

<https://www.scribd.com/document/290618953/Into-Dutch-Soils>.

Waghorn, T., 7 March 2011, "Fighting Desertification". Forbes.

Weigelt, J., Janetschek, H., Müller, A. and Töpfer, K., 2015, Soils in the Nexus. Current Opinion in Environmental Sustainability 15:5-8.

Weigelt, J., Müller, A., Janetschek, H., Töpfer, K., 2015, Land and soil governance towards a transformational post-2015 Development Agenda: an overview. Current Opinion in Environmental Sustainability 15:57-65.

Weingarten, P., 1997, Agri-environmental policy in Germany: soil and water conservation, Discussion paper // Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe, No. 4, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-22638>.

Whalley, W. R. et al., 1995, Biological Effects of Soil Compaction. Soil & Tillage Research 35:53-68.

Wikipedia, 2015, Corine Land Cover. [http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Corine\\_Land\\_Cover](http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Corine_Land_Cover).

Wikipedia, 2016, Groundwater. [https://en.wikipedia.org/wiki/Groundwater#Water\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Groundwater#Water_cycle).

Winkel, L., Berg, M., Amini, M., Hug, S. J. and Johnson, C. A., 2008, Predicting groundwater arsenic contamination in Southeast Asia from surface parameters, Nature Geoscience 1:536-542.

Wolff, G., Höke, S., Lazar S., Kaufmann-Boll C., 2011, Environmental impact of urban soil consumption. Urban SMS, Soil Management Strategy.

Wolters, V., 2001, Biodiversity of soil animals and its function. European Journal of Soil Biology 37(4):221-227.

土壤汚染をめぐるブラウンフィールド問題の実態等について(中間とりまとめ), 平成 19年3月.

#### [온라인 자료]

국가지하수정보센터, 2017, "지하수상식-깨끗한 지하수", 검색일: 2017.2.21.  
<https://www.gims.go.kr/waterOfClean.do>.

국가지하수정보센터, 2017, "지하수상식-지하수가 사라진다", 검색일: 2017.2.21.  
<https://www.gims.go.kr/waterOfPrecious.do>.

국가지하수정보센터, 2017, "지하수상식-지하수 이용현황", 검색일: 2017.2.21.  
<https://www.gims.go.kr/waterOfClean.do>.

국제 지하수자원 평가센터(IGRAC), 2017, <https://www.un-igrac.org/what-groundwater>  
뉴스포스트, 2016.12.19., "용산미군기지 지하수 유류 오염도, 정화기준 500배 초과".  
<http://blog.naver.com/newspost2006/220889805908>. 검색일: 2017.2.29.

(주)하이드로넷, 2017, "해수침투관측", 검색일: 2017.2.21.  
<http://www.hydronet.co.kr/kor/sub/rnd/rnd0202.php>.

중국 환경보호인터넷 (中国环保在线), 2016, REUTERS.. [www.antpedia.com](http://www.antpedia.com).

중국 수리부 (水利部, the ministry of Water Resources of the People's Republic of China). 2011. <http://www.mwr.gov.cn/>. 검색일: 2017.2.21.

중국 환경보호부 (中华人民共和国环境保护部), 2011.10.28., 关于印发《全国地下水污染防治规划(2011-2020年)》的通知 (《국가지하수오염방지계획(2011-2020년)》 발행). 검색일: 2017.1.2. [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201111/t20111109\\_219754.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201111/t20111109_219754.htm)

일본 국토교통성 (日本 国土交通省), 2017, 日本の水収支(일본의 물수지). 검색일: 2017.1.2. [http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/c\\_actual/actual01.html](http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/c_actual/actual01.html).

일본 국토교통성 (日本 国土交通省), 2017, Responding Properly to Issues on Water Resources, 검색일: 2017.1.2. [https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/water\\_resources/contents/responding\\_properly.html](https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/water_resources/contents/responding_properly.html).

일본 국토교통성 (日本 国土交通省), 2017, Issues on Water Resources. 검색일: 2017.1.2. [https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/water\\_resources/contents/issues.html](https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/water_resources/contents/issues.html).

일본 국토교통성 (日本 国土交通省), 2017, 지하수 관련 참조 자료. 검색일: 2017.2.1. [http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/seisaku\\_kenkyu/mizujunkan/03\\_4.pdf](http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/seisaku_kenkyu/mizujunkan/03_4.pdf).

일본 환경성, 2016, 일본 토양환경보전 정책. 접속날짜: 2017.3.20. <https://www.env.go.jp/en/water/wq/wemj/soil.html>.

일본 환경성, 2016., 일본의 토양환경보전 정책의 흐름. <http://www.env.go.jp/water/>.

일본 환경성, 2016, 일본 토양오염대책법의 체계. <http://www.env.go.jp/water/>.

일본 환경성, 2016, 일본 농경지 오염부지의 관리대책. <http://www.env.go.jp/water/>.

일본 환경성, 2016, 일본 농약 관리대책 체계. <http://www.env.go.jp/water/>.

일본 환경성, 2016, 일본 다이옥신류의 관리대책 체계. <http://www.env.go.jp/water/>.

중국 국가환경정보센터, 2016, 中國環境市場動向. [www.konetic.or.kr](http://www.konetic.or.kr).

퓨처에코, 2014.11.12., 13조원, 중국의 토양산업 블루오션을 잡아라. <http://www.ecofuturenetwork.co.kr/news/articleView.html?idxno=1200>.

한겨레신문, 1990.10.26., "지하수 환경기준 신설". 검색일: 2017.2.29.

환경부 물산업통계정보시스템, "중국의 수자원 문제의 현황과 향후전망(작성일: 2011,11,8)". [http://www.wabis.or.kr/foreign\\_act/3906](http://www.wabis.or.kr/foreign_act/3906), 검색일: 2017.2.29.

헤럴드경제, 2016.12.19., "용산미군기지 주변 지하수 '벤젠 범벅' ... 기준치 578배 초과". <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=016&aid=0001170754>. 검색일: 2017.2.29.

BGS (British Geological Survey), 2016, "Groundwater flooding in an unconfined major aquifer setting". 검색일: 2017.2.29. <http://www.bgs.ac.uk/research/groundwater/flooding/major.html>

- BMUB (Federal Ministry for the Environment, Nature Protection and Nuclear Safety), 2017, "Groundwater". 검색일: 2017.2.29.  
<http://www.bmub.bund.de/en/topics/water-waste-soil/water-management/groundwater/>
- ClassNotes.org.in., 2016.8.8., "Nitrogen cycle".  
<http://classnotes.org.in/class-9/natural-resources/nitrogen-cycle-2/>. 검색일: 2017.2.29.
- EC, 2017, "Water". <http://ec.europa.eu/environment/water/>. 검색일: 2017.3.29.
- EEA, 2008.2.18, "Impacts due to over-abstraction". 검색일: 2017.3.29.  
<http://www.eea.europa.eu/themes/water/water-resources/impacts-due-to-over-abstraction>
- EEA, 2017.3.16., "Water assessments for 2012 - European year of water".  
<http://www.eea.europa.eu/themes/water/water-assessments-2012>. 검색일: 2017.3.29.
- EPA, 2017, "Environmental Topics: Water Topics". 검색일: 2017.1.24.  
<https://www.epa.gov/environmental-topics/water-topics>
- EPA, 2017, "News Releases: U.S. EPA, California cleaned or tested 381 abandoned storage tanks, reducing groundwater threats". 검색일: 2017.3.30.  
<https://www.epa.gov/newsreleases/us-epa-california-cleaned-or-tested-381-abandoned-storage-tanks-reducing-groundwater>
- Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017, "Survey of the Austrian Water Management". 검색일: 2017.2.21.  
<https://www.bmlfuw.gv.at/english/water/Water-in-Austria/Survey-of-the-Austrian-Water-Management.html>
- Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017, "Protection and Monitoring of Water Bodies". 검색일: 2017.2.21.  
<https://www.bmlfuw.gv.at/english/water/Water-in-Austria/Protection-and-Monitoring-of-Water-Bodies.html>
- Ministrium für Ein Lebenswertes Österreich, 2017, "Groundwater Monitoring". 검색일: 2017.2.21. <https://www.bmlfuw.gv.at/english/water/Water-in-Austria/Protection-and-Monitoring-of-Water-Bodies.html>
- UN SDG, 2017, <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300>.
- USGS, 2016, "Contamination in U.S. Private Wells". 검색일: 2017.1.24.  
<https://water.usgs.gov/edu/gw-well-contamination.html>.
- USGS, 2016, "Contaminants Found in Groundwater" 검색일: 2017.1.24.  
<https://water.usgs.gov/edu/groundwater-contaminants.html>.
- USGS, 2016, "Groundwater depletion" 검색일: 2017.1.24.

<https://water.usgs.gov/edu/gwdepletion.html>.

USGS, 2016, "Groundwater and Drought" 검색일: 2017.1.24.

<https://water.usgs.gov/ogw/drought/>

USGS, 2016, "Pesticides in Groundwater" 검색일: 2017.1.24.

<https://water.usgs.gov/edu/pesticidesgw.html>.

USGS, 2016, "Land Subsidence" 검색일: 2017.1.24.

<https://water.usgs.gov/edu/earthgwlandsubside.html>

Water Encyclopedia, "Stream-Hydrology", 검색일: 2017.2.21.

<http://www.waterencyclopedia.com/St-Ts/Stream-Hydrology.html>.

## 주 의

1. 이 보고서는 환경부에서 시행한 환경기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 환경부에서 시행한 환경기술개발사업의 연구개발 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.